

# BULLETIN

## OUVRAGES D'ART

n° 82

Juillet 2023



## Sommaire

### ■ Les projets

---

Construction de la Plate-Forme d'Essais des Structures de l'Université Gustave Eiffel à Champs-sur-Marne – Partie 1 : cahier des charges, conception et exécution 5  
*Bruno Godart, François Toutlemonde, Pierre Marchand, Stéphane Rocher, Sophie Andreatta, Serge Favre, Sébastien Letort, Jérôme Moulin*

### ■ La méthodologie

---

Les apports de l'imagerie et de la reconnaissance des formes pour la gestion de patrimoine des ouvrages d'art – Partie 1 : recensement et identification 33  
*Constantin Ruellet, Pierre Charbonnier, Philippe Foucher, Christophe Heinkele, Hervé Davias, Thibaut Perrin, Adrien Dodane*

Tabliers multipoutres mixtes – Eléments de prédimensionnement 51  
*Hugo Laval, Fabien Renaudin, Sébastien Neiers, Damien Champenoy*

### ■ Les dernières publications OA du Cerema

---

Appuis en béton des ouvrages d'art - Tome 1 : conception et dimensionnement 78

Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art - Fascicule 5 : Conduite d'une intervention sur un ouvrage existant 79



**Remerciements :** La mise au point et la validation des articles publiés dans le présent numéro du bulletin OA ont été faites par Christelle Cros du département des Pyrénées Orientales, Eric Chasco du Cerema Sud-Ouest, Anil Abdoulhousen du Cerema Ile-de-France, Clément Amourette du Cerema Méditerranée, Christian Tessier de l'Université Gustave Eiffel, Pierre Corfdir, Gaël Bondonet, Roland Abou et Antoine Théodore du Cerema ITM.

**Version :** du 10 juillet 2023

**Directeur de la publication :** Pascal BERTEAUD

**Directeur délégué :** David ZAMBON

**Comité éditorial :**

- Roland ABOU (Cerema ITM)
- Gaël BONDONET (Cerema ITM)
- Cécile BOUVET AGNELLI (Cerema ITM)
- Jean-Christophe CARLES (Cerema Med)
- Christelle CROS (Département des Pyrénées Orientales)
- Renaud LECONTE (Setec Diades)
- Franziska SCHMIDT (Université Gustave Eiffel)
- Christian TESSIER (Université Gustave Eiffel)

**Rédaction en chef :** Antoine THEODORE (Cerema ITM)

**Photo de couverture :** Plate-Forme d'Essais des Structures de l'Université Gustave Eiffel – Photo Pierre Marchand

# Construction de la Plate-Forme d'Essais des Structures de l'Université Gustave Eiffel<sup>1</sup> à Champs-sur-Marne

## Partie 1 : Cahier des charges, Conception et exécution

**Bruno Godart<sup>1</sup>, François Toutlemonde<sup>2</sup>, Pierre Marchand<sup>3</sup>, Stéphane Rocher<sup>4</sup>, Sophie Andreatta<sup>5</sup>, Serge Favre<sup>6</sup>, Sébastien Letort<sup>7</sup>, Jérôme Moulin<sup>8</sup>**

<sup>1</sup> anciennement Université Gustave Eiffel / IFSTTAR, 5 Boulevard Descartes, Champs-sur-Marne, 77454 Marne-la-Vallée cedex2, [godart.br@orange.fr](mailto:godart.br@orange.fr)

<sup>2</sup> Université Gustave Eiffel, 5 Boulevard Descartes, Champs-sur-Marne, 77454 Marne-la-Vallée cedex2, [francois.toutlemonde@univ-eiffel.fr](mailto:francois.toutlemonde@univ-eiffel.fr)

<sup>3</sup> (anciennement IFSTTAR), Cerema, ITM, DTOA, GITEX, Parc de la Haute Maison, 16 rue Galilée 77420 Champs-sur-Marne, [pierre.marchand@cerema.fr](mailto:pierre.marchand@cerema.fr)

<sup>4</sup> (anciennement SNC-LAVALIN), TPF Ingénierie, 3 Rue de la Renaissance, 92160 Antony, [s.rocher@tpfi.fr](mailto:s.rocher@tpfi.fr)

<sup>5</sup> (anciennement SNC-LAVALIN), SETEC, 42-52 Quai de la Rapée, 75012 Paris, [sophie.andreatta@setec.com](mailto:sophie.andreatta@setec.com)

<sup>6</sup> Léon GROSSE, 21 bis avenue Salvador Allendé, CS 50025 - 69676 BRON, [s.favre@leongrosse.fr](mailto:s.favre@leongrosse.fr)

<sup>7</sup> Léon GROSSE, 4 Parvis Colonel Arnaud Beltrame CS60001 – 78009 VERSAILLES, [s.letort@leongrosse.fr](mailto:s.letort@leongrosse.fr)

<sup>8</sup> BAUDIN CHATEAUNEUF, 60 Rue de la Brosse, 45110 Châteauneuf-sur-Loire, [jerome.moulin@baudinchateauneuf.com](mailto:jerome.moulin@baudinchateauneuf.com)

---

## Résumé

Dans le cadre du transfert de l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux) de son site parisien du boulevard Lefebvre à la cité Descartes à Champs-sur-Marne, une nouvelle plate-forme d'essais des structures (PFES) a été construite de 2011 à 2013. Afin de mieux répondre aux besoins des équipes du pôle de recherche Paris-Est et de favoriser les expérimentations en partenariat, ses dimensions ont été portées à 10 m x 60 m et deux murs de réaction de 5 mètres de hauteur lui ont été adjoints. La structure est constituée d'un caisson multi-alvéolaire en béton armé pouvant reprendre des efforts verticaux jusqu'à 600 tonnes sur le hourdis supérieur et des efforts horizontaux de 100 tonnes en tête de mur, avec des déformations très faibles. Le hourdis supérieur présente une épaisseur variant de 0,90 m à 1,25 m. Les murs de réaction sont constitués d'une structure mixte associant des peaux métalliques connectées à un noyau en béton, pour une épaisseur totale de 1,10 m. L'article décrit les principes adoptés pour la construction, le cahier des charges de cette structure, les hypothèses de conception et les diverses étapes détaillées de la construction illustrées par de nombreuses photos, qui ont abouti à la mise en service d'un équipement exceptionnel qui aujourd'hui, dix ans après sa construction, est parfaitement fonctionnel et donne toute satisfaction à ses utilisateurs.

---

<sup>1</sup> L'Université Gustave Eiffel a été créée par fusion, au 1er janvier 2020, de l'IFSTTAR, de l'université Paris-Est-Marne-la-Vallée, de l'école d'architecture de Marne-la-Vallée et de trois écoles d'ingénieur (ESIEE, ENSG et EIVP).

# I. Contexte de la construction de la PFES

## I.1 Historique

Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), créé à partir des laboratoires de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), s'est installé en 1949 au numéro 58 du Boulevard Lefebvre à Paris. L'idée d'implanter une dalle d'essais des structures au Laboratoire Central remonte à 1962 lors du projet d'extension d'un second bâtiment laboratoire au LCPC [1].

Compte tenu de l'exiguïté des lieux, la dalle d'essais fut implantée en sous-sol de ce bâtiment avec une rampe d'accès assez raide (16 %) qui compliquait la livraison des corps d'épreuves de grande taille et l'exploitation de la dalle en raison d'un accès transversal à celle-ci. La construction du hall d'essais des structures démarra en 1964 et fut achevée en 1967.

La partie centrale du hall d'essais était occupée par deux dalles, l'une de 8 m x 20 m destinée aux essais statiques, l'autre de 8 m x 8 m et d'épaisseur 1 m réservée, en principe, aux essais dynamiques (*figure 1*). Les deux dalles ont été bâties sur des fondations indépendantes de celles du bâtiment, notamment pour éviter la transmission de vibrations dans les étages supérieurs lors d'essais dynamiques. L'espace disponible au-dessus des dalles avait une hauteur de 7 m et il était desservi par deux ponts-roulants de 100 kN de capacité. La description très détaillée de la construction de cette dalle d'essais par Maurice Diruy [1] fut très précieuse pour concevoir et construire la nouvelle plateforme d'essai des structures (PFES) à Champs-sur-Marne. Le principe de la modularité des superstructures de montage (meccano) qui avait permis à l'installation de s'adapter aux besoins multiples des investigations expérimentales sur structures de géométrie et matériaux constitutifs variés, est lui-même apparu comme un élément déterminant de la nouvelle installation à concevoir.



Figure n°1 : vue générale de l'ancienne dalle d'essais au LCPC à Paris avec au fond la dalle pour essais dynamiques

La raison d'être des expérimentations sur structures ne s'est en fait jamais démentie depuis la période de construction de cette plateforme d'essais, y compris au cours d'une période où la nécessité d'investiguer à une échelle représentative relativement onéreuse le fonctionnement d'éléments structurels supposé prédictible pouvait être questionnée par le développement spectaculaire des moyens de calcul. En effet, le fonctionnement non-linéaire complexe des matériaux et assemblages du génie civil, la vérification de la sécurité en fatigue ou à la rupture, l'analyse de solutions constructives innovantes ou du fonctionnement des ouvrages vieillissants développant précocement des comportements dégradés, ont toujours justifié la complémentarité de cet outil avec les investigations à l'échelle du matériau, le travail de modélisation, et l'analyse du retour d'expérience issu de l'observation des ouvrages exploités dans leur environnement [2].

## **I.2 Stratégie du déménagement de l'IFSTTAR à Champs-sur-Marne**

Le regroupement stratégique du LCPC, de l'INRETS (Institut National pour la Recherche sur les Transports et leur Sécurité) et de l'Ecole des Ponts sur le campus de la cité Descartes, à proximité notamment de l'Université de Marne-la Vallée, du CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) et du LRMH (Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques), constituait un engagement fort pour porter la vision d'un pôle de recherche et d'enseignement de niveau européen et même international dans les domaines du génie civil, de la construction, de la ville et des transports. La première étape de ce regroupement fut la fusion au 01/01/2011 du LCPC et de l'INRETS pour former l'IFSTTAR. Cette fusion fut suivie par la création au 1er janvier 2020 d'une nouvelle université, l'Université Gustave Eiffel, résultant de la fusion de l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée et de l'IFSTTAR, et intégrant une école d'architecture (l'EAV&T – Ecole d'Architecture de la Ville & des Territoires Paris-Est) et trois écoles d'ingénieurs (l'EIVP - Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris, l'ENSG Géomatique – Ecole Nationale des Sciences Géographiques, et ESIEE Paris – École supérieure d'Ingénieurs en Electrotechnique et Electronique). Cette nouvelle université bénéficiait du soutien du programme d'investissements d'avenir (PIA).

Les équipements scientifiques et techniques de ce pôle étaient au cœur de la crédibilité de cette ambition. Dans le cadre du projet de construction des bâtiments « Bienvenüe » et « Descartes + », les bâtiments abritant ces équipements ont été conçus pour une efficacité et une ergonomie optimisée, au service de recherches et de démonstrations susceptibles d'être portées et partagées par l'ensemble des membres du pôle de recherche et d'enseignement. C'est ainsi que la plateforme d'essais des structures de l'IFSTTAR a été conçue pour répondre aux besoins de rendre les constructions et les ouvrages de génie civil plus économes et performants d'un point de vue environnemental, plus robustes vis-à-vis des risques naturels et anthropiques, plus durables, moins coûteux en termes de maintenance et de réparation, et au service de tous les types de mobilité. Afin de répondre à ces besoins, les capacités de cette nouvelle installation ont été réévaluées pour tenir compte de la demande croissante de démonstrateurs de structures à une échelle suffisamment représentative (pouvant aller jusqu'à l'échelle 1), pour mieux appréhender le comportement de nouvelles structures et valider des modélisations complexes, et aussi pour tenir compte de l'amélioration des performances mécaniques des matériaux et de leur valorisation dans des structures innovantes. Ce grand équipement a été également conçu pour favoriser le travail collaboratif entre plusieurs équipes du pôle.

Il n'a pas été pris en compte pour la PFES de fonctionnalités associées à des chargements « climatiques » (principalement thermiques et hydriques), dans la mesure où un équipement dédié était parallèlement réalisé à proximité dans le cadre d'un financement du plan d'investissement d'avenir ; il s'agit de l'équipement d'excellence « Sense-City » qui constitue maintenant avec la PFES l'une des « vitrines » de l'université Gustave Eiffel sur son site marnovallien, pour ce qui est de la capacité d'investigations expérimentales sur démonstrateurs à une échelle pertinente pour les constructions et ouvrages du génie civil et urbain.

La construction du bâtiment hébergeant le Pôle Scientifique et Technique a été effectuée sous la maîtrise d'Ouvrage du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer, sous la conduite d'opération de la DDE 77 et sous la maîtrise d'œuvre de l'architecte mandataire Jean Philippe PARGADE associé au Bureau d'Etudes SNC-LAVALIN.

## **I.3 Les principes de conception de la PFES**

La PFES est particulièrement utile pour étudier expérimentalement le comportement de nouvelles structures et pour tester des structures innovantes jusqu'à la rupture, dans le cas où les modélisations et simulations numériques sont soit inexistantes soit insuffisantes ou inadaptées pour répondre aux

questions posées par les maîtres d'ouvrages, les bureaux d'études et les entreprises de construction. Quatre principes « fondateurs » ont prévalu pour sa construction.

Le premier principe était de construire une Plateforme d'Essais des Structures dont le Génie Civil soit compatible avec les équipements associés (« meccano » nécessaire au montage des essais, vérins, groupe hydraulique, matériels de mesure, etc.). Ces équipements représentant un coût important et étant en bon état, il était intéressant de les déménager de Paris à Champs-sur-Marne pour les réutiliser. Les ponts-roulants ne pouvaient pas être déménagés en raison essentiellement de leur portée inadaptée à la largeur de la future PFES. L'espacement des puits servant à ancrer les barres permettant de fixer les montages à la PFES devait donc être conservé pour pouvoir réutiliser le « meccano » existant. Cela s'est traduit par la construction de puits distants de 1 m sur une grande partie de la surface de la plate-forme d'essais, et de puits distants de 50 cm dans une zone spécifique.

Le second principe a été d'agrandir la surface d'essai qui est ainsi passée de 224 m<sup>2</sup> (160 + 64) à 600 m<sup>2</sup> (60 x 10) afin de pouvoir accueillir des tronçons de structure à l'échelle 1 et de pouvoir réaliser plusieurs campagnes d'essais simultanément. La décision de reconstruire une seule grande dalle fut également prise pour pouvoir mener indifféremment des essais statiques et des essais dynamiques quelle que soit leur localisation sur la dalle, tout ceci étant issu de l'expérience acquise sur le fonctionnement de l'ancienne dalle. L'agrandissement de la surface de dalle permettait également d'accueillir des essais dédiés à la formation des élèves-ingénieurs des écoles voisines.

Le troisième principe qui constitue une innovation en France, fut d'ajouter deux murs de réaction de dimension 5 m x 5 m. Ces murs permettent de fixer des vérins horizontaux afin de solliciter les structures dans les deux directions horizontales (c'est notamment le cas lors d'essais de résistance des structures aux séismes ou aux vents). Ils permettent d'économiser substantiellement du « meccano » car il fallait faire sur l'ancienne PFES de Paris des montages complexes pour pouvoir appliquer des efforts horizontaux sur des éléments de structure. Les figures 2 et 3 montrent un exemple de montage complexe pour charger un voussoir de tunnel avec des efforts horizontaux et verticaux concomitants - projet national BEFIM [3].

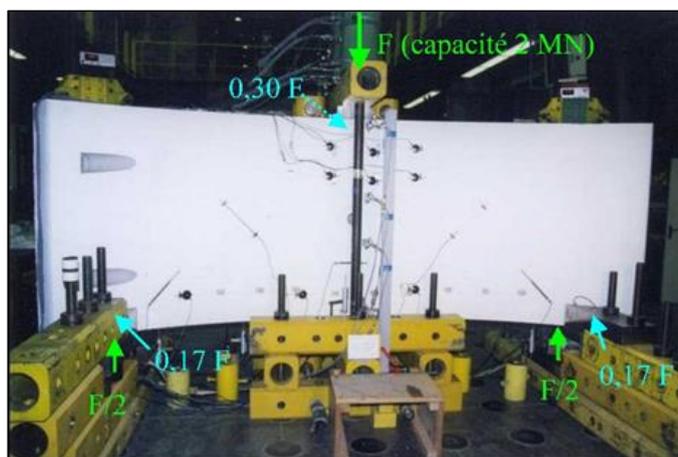


Figure n°2 : essai de cisaillement du voussoir.

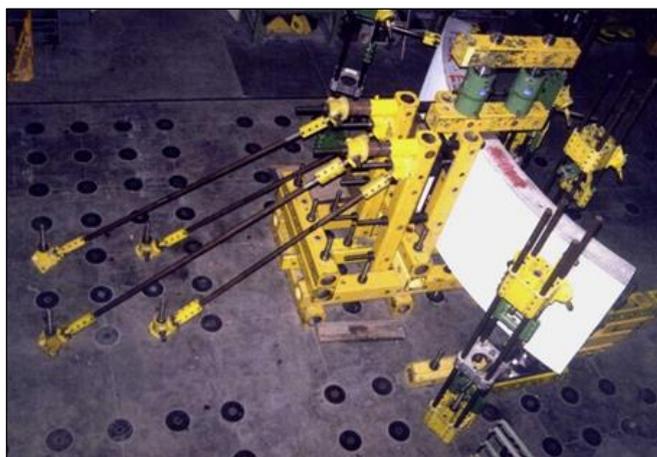


Figure n°3 : vue du contreventement nécessaire pour éviter le basculement du voussoir.

Le choix de la taille des murs et de leur position fut décidé après avoir visité ou après s'être documenté sur quelques murs de réactions dans des laboratoires étrangers, et notamment à l'école Polytechnique de Montréal (un mur de réaction de forme en L avec deux ailes de 10 m de hauteur sur 12 m de longueur chacune) et au « European Laboratory for Structural Assessment » du « Joint Research Centre » d'Ispra en Italie (un mur unique de réaction de 16 m de haut et de 21 m de longueur).

Le quatrième principe « fondateur » fut d'avoir un accès de plain-pied dans l'axe longitudinal de la dalle de façon à faciliter la livraison et l'évacuation de corps d'épreuve potentiellement lourds ou encombrants.

Enfin, d'autres principes et choix plus techniques furent appliqués en accord avec la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre :

- La construction de la PFES sur des fondations indépendantes du bâtiment d'accueil de la PFES, sur des barrettes ancrées dans le substratum ;
- L'insertion de la dalle d'essai en continuité de plain-pied avec l'ensemble des laboratoires et ateliers « lourds » (fabrication béton, presses) et en interaction directe avec les expérimentations sur modèles (atelier mécanique, atelier de soudage, atelier de métrologie) ;
- La construction d'une dalle et de murs d'essais extrêmement rigides, avec des critères de déformabilité bien définis, pour éviter des difficultés de pilotage d'essai et d'interprétation des mesures ;
- La conception d'une dalle et de murs sans autoriser la fissuration sous les charges de service de façon à ne pas altérer la rigidité recherchée ;
- Le choix d'une structure en béton armé plutôt qu'en béton précontraint, pour éviter d'avoir à gérer les déformations différées par fluage du béton d'une structure très hyperstatique, de façon à limiter les risques de fissuration ;
- L'utilisation de matériaux de grande rigidité, possiblement du BFUP (Béton Fibré à Ultra-haute Performance) pour la réalisation des deux murs de réaction, de façon à limiter leur emprise ;
- L'obligation de pouvoir accéder à la sous face de la dalle d'essais pour pouvoir intervenir sur la fixation des barres de montage des essais ;
- La mise en œuvre de deux ponts-roulants de 150 kN chacun (susceptibles d'être couplés) circulant sur une structure poteau-poutres de roulement indépendante des poteaux supportant la couverture en forme de dalle vague qui abrite la PFES (2 ponts-roulants de 160 kN ont finalement été installés).

## II. Conception de la PFES

### II.1 Cahier des charges à destination du bureau d'études

Le cahier des charges pour le dimensionnement de la PFES, établi en 2009 par le LCPC en lien étroit avec le maître d'ouvrage, reprenait les principes définis ci-dessus en les explicitant de façon à ce que le bureau d'études SNC LAVALIN puisse faire son projet. Il apparaissait que la conception et le dimensionnement de la PFES étaient davantage pilotés par le respect du critère de déformation à l'Etat Limite de Service (flèche limitée au  $1/10000^{\text{ème}}$  de la portée soit 20 fois plus faible que les déformations typiquement acceptées aux états limites de service pour les modèles rigides à tester comme des poutres en béton), que par la résistance à l'Etat Limite Ultime. Une douzaine de configurations de cas de charge ont été définis pour dimensionner la PFES, ces cas de charges constituant une sorte d'enveloppe de toutes les configurations possibles de montage d'essai.

La PFES devait être considérée, du point de vue de son dimensionnement et de sa réalisation, comme un ouvrage de génie civil construit au sein d'un bâtiment, et pour cela les règles techniques afférentes aux ouvrages de génie civil devaient s'appliquer : Eurocode 2 « Ponts » (NF EN 1992-2) [5] et fascicule 65 du CCTG.

### II.2 Projet de conception de la PFES

La reconnaissance des couches de terrain réalisée par la société Sémofi a permis d'identifier les différentes couches de sol rencontrées qui sont reportées sur la figure 4 sur laquelle les courbes rouges supérieure et inférieure positionnent les niveaux respectifs du rez-de jardin et du sous-sol du bâtiment et

qui indique la présence du substratum du calcaire de Champigny à partir de 27,5 m à 30,5 m de profondeur.

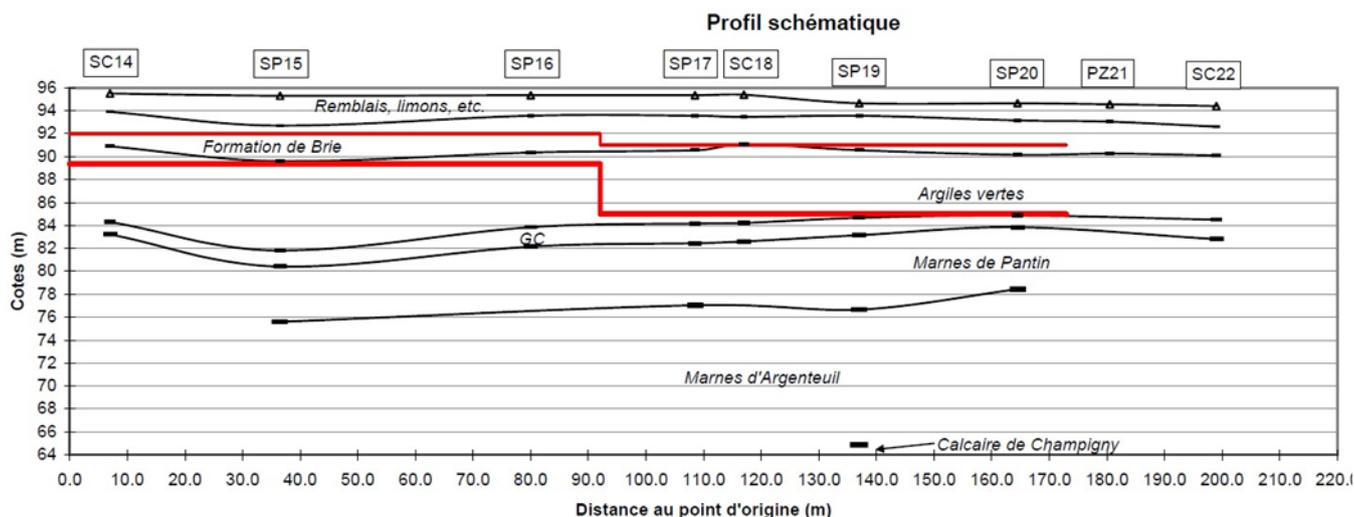


Figure n°4 : Profil schématique du sol (GC = Glaises à Cyrènes - Doc. Sémofi).

La conception de la PFES fut élaborée en 2010 par SNC LAVALIN et discutée avec le maître d'ouvrage et le LCPC. Le bureau d'étude proposa une solution de poutre caisson longitudinale posée sur des fondations de type barrettes et supportant 2 murs d'essais encastres dans celle-ci (figures 5 à 7). Il fut donc décidé de fonder la PFES sur des barrettes au niveau du substratum calcaire, traversant ainsi les couches de marnes et argiles gonflantes. En périphérie de la PFES, devait être réalisé un ensemble de parois moulées nécessaire au soutènement des terres pour la partie enterrée de la PFES, puis l'exécution de barrettes longues d'environ 30 m, ancrées dans le calcaire. La descente de charges maximale par barrette était estimée à 625 T pour une déformation en partie supérieure de la PFES inférieure à 1,0 mm.

Les dimensions en plan de la PFES furent fixées à 60,50 m de long et 10,50 m de large pour une hauteur totale de 6 m. L'épaisseur de la table supérieure fut fixée à 90 cm en zone de puits espacés (inter-distance 1m) et à 125 cm en zone de puits rapprochés (inter-distance 0,5m) induisant des efforts plus importants et nécessitant une table plus épaisse. L'épaisseur du radier fut fixée à 40 cm. Les raidisseurs longitudinaux et les raidisseurs transversaux avaient une épaisseur de 60 cm (figures 5 à 7). Les raidisseurs longitudinaux étaient régulièrement percés d'ouvertures (1m x 2m) permettant l'accès aux alvéoles de la PFES. La table supérieure et les murs étaient équipés de puits métalliques destinés au bridage des superstructures des montages d'essais. Chaque puits pouvait être soumis à un effort vertical (pour la dalle) ou horizontal (pour les murs) de 500 kN en service, avec un effort tangentiel concomitant de 100 kN. Pour limiter leur épaisseur, les murs de réaction devaient posséder une rigidité correspondant à un module équivalent moyen de 55 GPa, une réalisation en Béton Fibré à Ultra-haute Performance (BFUP – avec une résistance caractéristique à la traction supérieure à 9 MPa) étant envisagée.

Un modèle 3D fut élaboré par SNC LAVALIN pour étudier le pré-dimensionnement de la structure, positionner les puits et les murs de réaction par rapport aux raidisseurs, et pouvoir mettre au point le CCTP (figures 8 à 10).

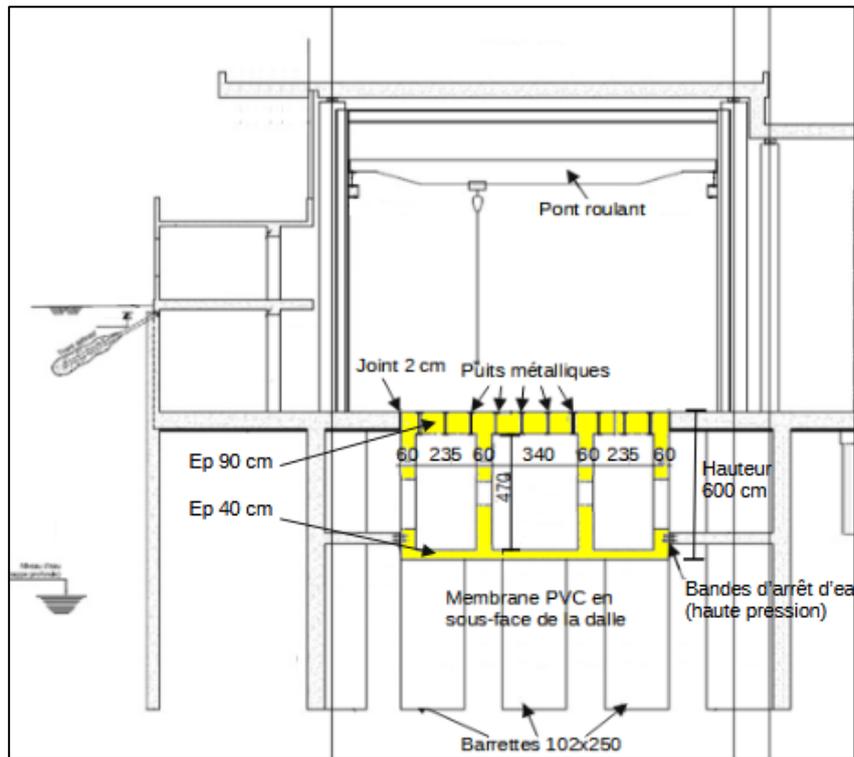


Figure n°5 : Coupe transversale du bâtiment incluant les halls des laboratoires sur la gauche de la PFES, la poutre caisson en jaune et le positionnement des barrettes de fondation (projet).

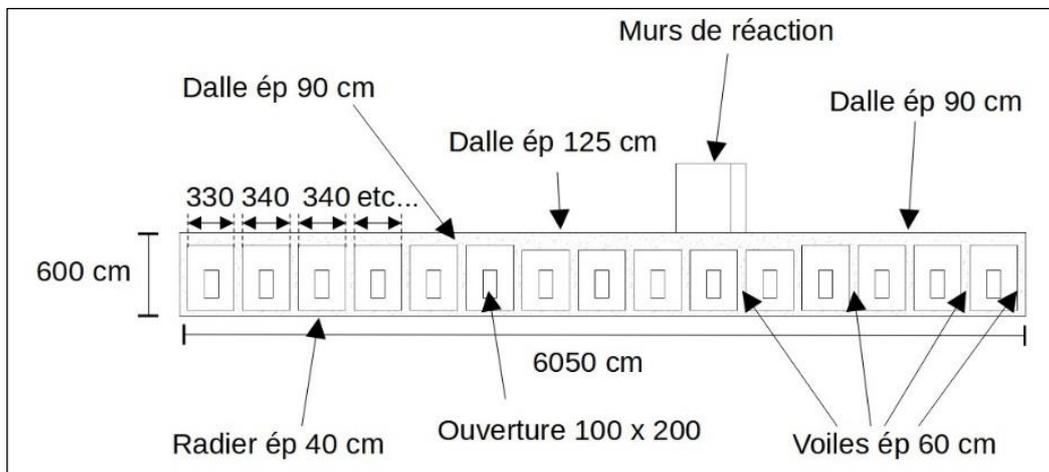


Figure n°6 : Coupe longitudinale de la PFES

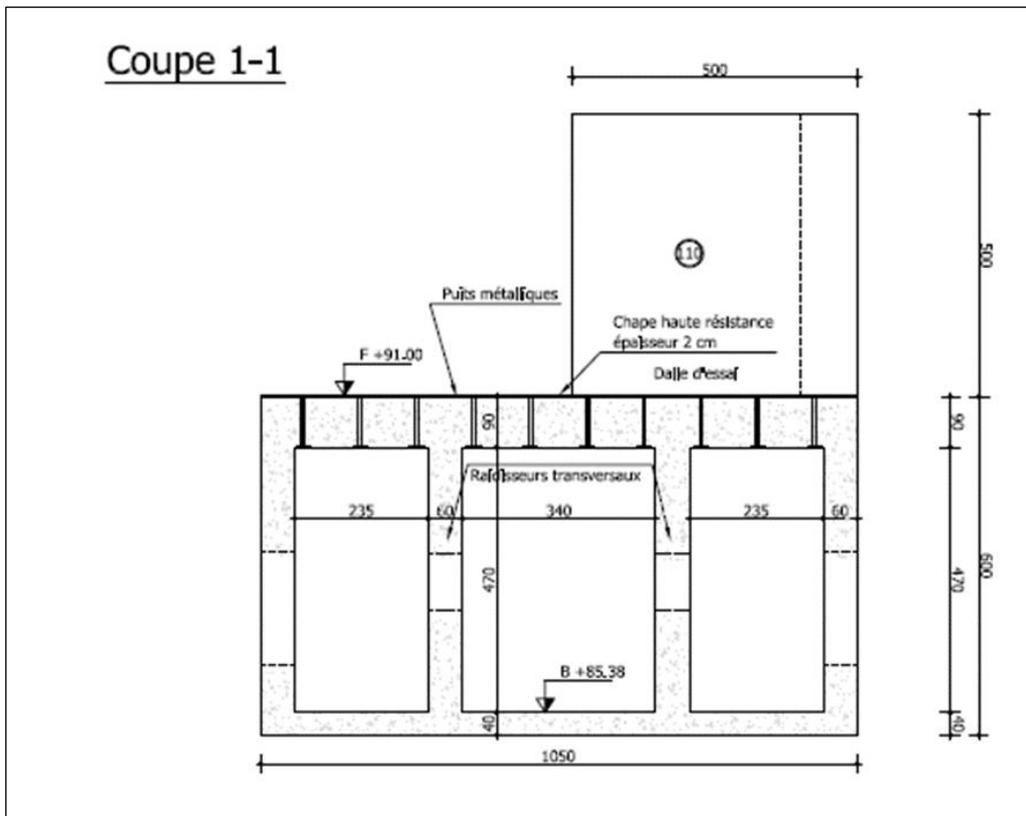


Figure n°7 : Coupe transversale de la PFES

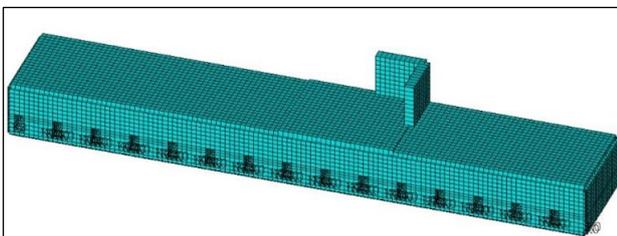


Figure n°8 : Modèle 3D de la PFES avec ses murs de réactions et les ouvertures dans les alvéoles (SNC LAVALIN)

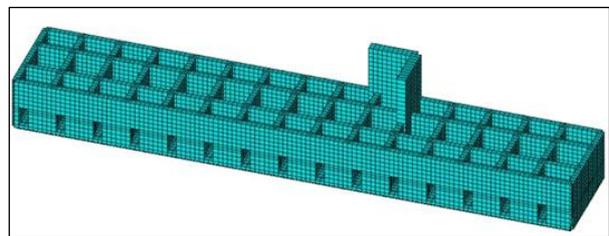


Figure n°9 : Modèle 3D de la PFES avec ses raidisseurs (SNC LAVALIN)

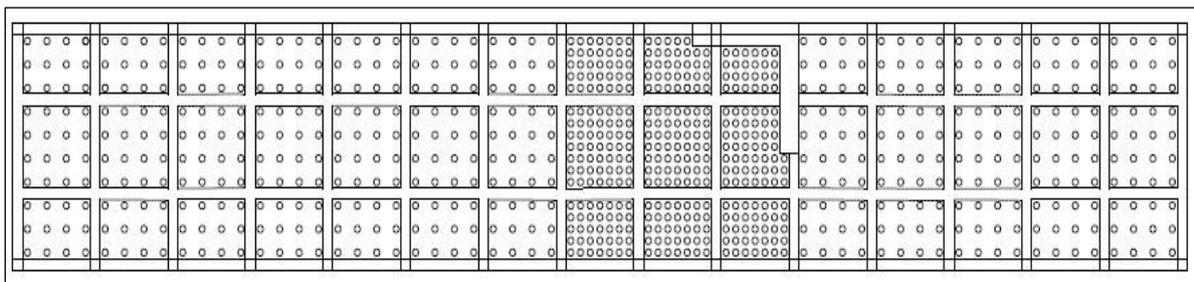


Figure n°10 : Implantation des puits par rapport aux raidisseurs et aux murs de réaction.

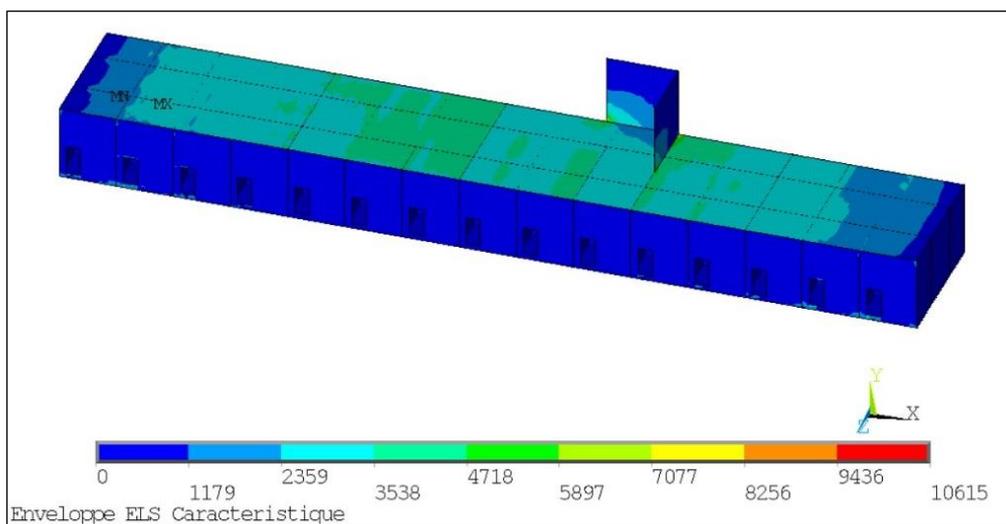


Figure n°11 : Exemple de résultat du calcul du dimensionnement : contraintes  $S_y$  de traction en fibre supérieure pour l'enveloppe des efforts à l'ELS caractéristique (valeurs en kPa). (SNC LAVALIN)

## II.3 CCTP relatif à la PFES

Le CCTP (Cahier des Clauses Techniques Particulières) du DCE (Dossier de Consultation des Entreprises) établi en septembre 2010 pour la PFES a été intégré dans le CCTP général relatif au bâtiment Bienvenue (lot Gros Œuvre) et précisait une durée d'utilisation de projet de 50 ans. Nous présentons ci-après les spécifications détaillées relatives à la construction de la PFES.

### II.3.1 Matériaux

Utilisation d'un béton de caractéristiques minimales  $f_{ck} \geq 50$  MPa,  $f_{ctk} \geq 3,5$  MPa (B(T)HP), de module d'Young élevé typiquement  $E > 35$  GPa, avec des valeurs faibles de fluage et de retrait.

Le coulage de la dalle était préconisé l'hiver pour limiter la traction due aux dilatations thermiques empêchées et pour limiter la température maximum atteinte lors du coulage des parties massives.

### II.3.2 Critères ELS et ELU

#### II.3.2.1 ELS caractéristique

Limitation des contraintes :

- Béton comprimé  $\sigma_c \leq 0.45 f_{ck}$
- Aciers HA tendus  $\sigma_s \leq 0.8 f_{yk}$
- Non fissuration en effort tranchant
- Respect du critère donné par l'annexe QQ de l'Eurocode 2 partie 2 [5].

Limitation des flèches :

- Pour la dalle, la flèche maximale autorisée était égale au 10 000<sup>ème</sup> de la portée du montage avec un maximum de 1 mm.
- Concernant les deux murs d'essai qui sont encastrés sur la dalle, la flèche maximale autorisée était égale au 10 000<sup>ème</sup> de la portée du montage avec un maximum de 1 mm sous une charge horizontale en tête de 500 KN.
- Le calcul des flèches a été prévu en considérant que la structure est fissurée, mais en tenant compte d'une certaine participation du béton tendu à la rigidité d'ensemble, en utilisant une inertie calculée comme la moyenne de l'inertie non fissurée et de l'inertie fissurée (selon les recommandations CEBFIP reprises dans l'Eurocode 4 [5]).

Contrôle de la fissuration :

- Ouverture des fissures limitée à 0,2 mm (Eurocode 2, section 7, [4])

### II.3.2.2 ELS fréquent

Limitation des contraintes :

- Béton tendu  $\sigma < f_{ctk}, 0.05$  (pour éviter la fissuration)

Limitation des flèches sous sollicitation soutenue :

- Pour un chargement variable de longue durée (0,5 x charge caractéristique), la flèche totale (flèche instantanée + flèche due au fluage) devait être inférieure au  $10\,000^{\text{ème}}$  de la portée du montage avec un maximum de 1 mm. On considérait que les chargements de longue durée commençaient un an après la construction de la dalle. On tenait compte d'une inertie intermédiaire et d'un module différé pour un béton chargé à long terme.

Autres vérifications :

- Limitation des contraintes en fatigue par respect du critère donné par l'EN1992-1-1 partie 6.8.4 concernant les variations de contraintes dans les aciers pour 100 millions de cycles (ordre de grandeur,  $D_s = 110$  MPa pour  $100 \cdot 10^6$  cycles) pour un chargement correspondant à « l'ELS fréquent » soit 0,6 fois les valeurs caractéristiques.

### II.3.2.3 ELU

Vérification de la résistance.

### II.3.2.4 Comportement dynamique

Les modes propres de la dalle associée à ses appuis et aux murs devaient avoir une fréquence propre supérieure à 5Hz, qu'il s'agisse de modes verticaux ou horizontaux, avec vérification de l'amplitude des déplacements sous l'excitation d'une force d'intensité 600 kN à une fréquence de 5 Hz (amortissement de 5%).

## II.3.3 Chargements

La charge statique caractéristique portée par la dalle, hors montages, est de 100 kN/m<sup>2</sup>. La section de la dalle d'essai (poutre caisson) devait satisfaire aux exigences de l'ELS caractéristique sous les moments de flexion créés par un couple de 50 MN.m dans le plan vertical et un couple de 25 MN.m dans le plan horizontal. On prévoyait également un chargement routier sur la dalle de type LM1 et LM2.

La capacité des divers montages possibles était basée sur les hypothèses suivantes :

- Chaque puit pouvait être bridé à 500 kN puis chargé en compression ou en traction à 500 kN.
- L'effort horizontal que pouvait reprendre chaque puit est de 100 kN.
- La valeur de la charge caractéristique Q sur les points d'ancrage des murs était de 500 kN perpendiculairement au mur, et de 100 kN dans les directions tangentielles au mur.

A l'ELS fréquent, les chargements étaient multipliés par 0,6. Pour les charges de longue durée, les chargements étaient multipliés par un facteur 0,5.

### II.3.4 Tolérances sur l'implantation des puits

Le CCTP indiquait les niveaux de performance à atteindre dans la réalisation de l'ouvrage, notamment les niveaux de tolérance géométrique pour l'implantation des puits :

- Nivellement de la face supérieure des puits (face d'appui) :  $\pm 0,5$  mm.
- Tolérance sur l'entraxe de 2 puits distants de moins de 4m :  $\pm 0,1$  mm.
- Tolérance sur l'entraxe des puits pour l'ensemble des puits :  $\pm 0,5$  mm.
- Tolérance sur l'inclinaison des puits qui doit rester inférieure à  $0,1 \cdot 10^{-3}$  rad (0,5 mm à 5m).

Ces tolérances étaient notamment imposées par la compatibilité avec les éléments métalliques des superstructures des montages d'essai. Le CCTP prévoyait également la vérification de l'absence de vides sous les platines des puits par gammagraphie et par radar. Dans le cas où des vides seraient détectés, l'entreprise devait procéder à l'injection de résine et à une nouvelle série de vérification jusqu'à disparition complète des vides. En outre, une vérification du filetage des puits par vissage de barres était indiquée.

### **II.3.5 Contrôles**

La mission de visa du maître d'œuvre était une mission VISA renforcée, et un examen complémentaire des plans ainsi que du Plan Assurance Qualité (PAQ) de l'entreprise était confié à un CETE (Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement, fusionné depuis au sein du Cerema).

Au stade de la formulation et de la mise en œuvre des matériaux, le CCTP mentionnait une fréquence des contrôles sur chantier par le MOE plus importante que sur un chantier classique, et notamment des contrôles inopinés, et un contrôle extérieur par le CETE IdF portant notamment sur 4 ou 5 barrettes de fondation (sur une quarantaine au total) et sur la géométrie de l'implantation des puits dans la dalle. En outre, le bureau de contrôle également présent sur ce chantier prévoyait d'examiner :

- la formulation des bétons prévus pour la dalle ainsi que les documents attestant de leur conformité;
- le procédé d'exécution ainsi que le phasage des travaux de la dalle et de ses fondations ;
- le détail des essais d'autocontrôle prévus par l'entreprise ainsi que des contrôles extérieurs prévus par la MOA/MOE.

Du point de vue des contrôles, le CCTP spécifiait pour les fondations :

- un contrôle renforcé de la continuité et de la qualité des panneaux de parois moulées et des barrettes via des mesures soniques (présence de tubes d'auscultation) ;
- un contrôle interne (par l'entreprise) de la totalité des barrettes.

Le CCTP spécifiait pour la structure :

- des essais de contrôle interne à l'entreprise ;
- un contrôle extérieur (réalisé par le CETE Ile de France) ;
- la liberté d'accès au chantier pour le contrôleur extérieur (CETE IdF) et le LCPC.

Pour le bétonnage de la PFES, un point d'arrêt était prévu avant chaque phase de bétonnage pour contrôler le ferrailage, vérifier les enrobages et accepter la procédure de bétonnage.

### **II.3.6 Essais et contrôles de réception de la PFES**

Les essais de chargement étaient destinés à vérifier la rigidité effective de la dalle et des murs. Lors des essais, les vérifications suivantes devaient être effectuées :

- Déformations et flèches sous moment négatif et positif en milieu d'alvéole. Différents types d'alvéole devaient être testés :
  - alvéole en zone courante,
  - alvéole en zone d'about,
  - alvéole en zone de puits resserrés.
- Déformation sous moment négatif sur raidisseur. Différents emplacements devaient être testés :
  - raidisseur longitudinal, 1 en zone courante, 1 en zone resserrée,
  - raidisseur transversal, 1 en zone resserrée, 1 en zone courante, 1 en zone d'about.
- Déformation et flèches de chaque mur sous sollicitation horizontale.

Le chargement appliqué devait correspondre à 0,75 fois le chargement fréquent (soit 0,45 fois la charge caractéristique). Cela conduisait à une force horizontale de 45 T pour les murs de réaction, et une force verticale de 225 T pour les montages sur la partie horizontale de la dalle. Les effets de la combinaison

fréquente ne devaient pas être dépassés une fois pris en compte les effets du gradient thermique le jour de l'essai et du chargement appliqué, ceci pour éviter toute fissuration. Le chargement devait être interrompu si l'on dépassait la déformation correspondant à la contrainte caractéristique de fissuration ou si un début de fissuration était détecté.

Lors des chargements statiques une succession de 3 cycles de chargement devait être effectuée de façon à vérifier la linéarité du comportement. Les flèches devaient être inférieures à 1,1 fois celles calculées.

Les fréquences propres de la dalle devaient être mesurées lors de vibrations entretenues au moyen d'un excitateur de type balourd sollicitant successivement la structure dans les directions longitudinale, transversale et verticale. Les fréquences mesurées devaient être supérieures à 0,95 fois celles calculées.

### **III. Exécution de la PFES**

Le marché de construction du Bâtiment Bienvenue (lot Gros Œuvre) incluant la PFES fut attribué à l'entreprise Léon Grosse en septembre 2010. Les travaux de construction de la PFES démarrèrent en 2011. L'exécution fut réalisée avec un souci de qualité et nous allons, dans le présent article, en retracer les grandes étapes sous forme de reportage photographique. Les difficultés particulières qui se sont présentées et la façon dont elles ont été résolues seront abordées dans un second article à paraître dans un prochain numéro du bulletin ouvrages d'art.

Les études d'exécution ont été réalisées par LEON GROSSE et son bureau d'études CTE, le contrôle des documents d'exécution par le CETE Nord-Picardie et SNC LAVALIN, et le contrôle des travaux d'exécution par le CETE Ile-de-France ainsi que SNC Lavalin (SNC Lavalin ayant la mission visa des documents d'exécution ainsi qu'une mission de suivi d'exécution renforcée).

#### **III.1 Au cours de l'année 2011**

En 2011, les 39 barrettes de fondation de la PFES (longueur moyenne de 23 m, section transversale 2,80 m x 0,82 m) et les parois moulées ont été exécutées par Spie Fondations dans le cadre du marché général des fondations et n'ont donné lieu à aucun problème particulier (*figure 13*). Les barrettes ont été ancrées de 2 m dans le calcaire de Champigny et des travaux de confortement par injection sous pression des fracturations du calcaire ont été menés afin de reconstituer une continuité mécanique efficace. A noter qu'un essai statique en compression axiale d'une barrette (numéro 27) a été effectué selon la norme NF P 94-150-1 pour contrôler le tassement en tête de fondation profonde qui devait rester inférieur à 0,6 mm.

#### **III.2 De novembre à décembre 2011**

Le radier inférieur du caisson de 40 cm d'épaisseur a été coulé avec un béton C60/75 ; 280 m<sup>3</sup> de béton et 95 tonnes d'aciers de béton armé ont été nécessaires, ce qui représente un ratio d'armatures de 340 kg/m<sup>3</sup>. Les figures 12 à 17 illustrent l'exécution du radier avec des photos prises le 29 novembre 2011.



Figure n°13 : Cage de ferrailage d'une barrette en cours de pose.



Figure n°12 : Vue générale du ferrailage du radier en cours de montage.



Figure n°14 : Amorces de ferrailage des voiles des raidisseurs.



Figure n°15 : Coulage du béton et vibration en cours du béton du radier.



Figure n°16 : Contrôle de la géométrie par l'entreprise.



Figure n°17 : Joint d'étanchéité placé sur le pourtour du radier

Tableau 1 : formule du béton C60/75 utilisé pour l'exécution du radier et des raidisseurs et fabriqué par la centrale de chantier de Léon Grosse

Constituants	Masse en kg pour 1 m <sup>3</sup> de béton
Sable 0/4 A2C Les Ormes	781
Gravillon 4/10 RL A2C Les Ormes	861
CEM II LL 42.5 Xeuillet	460
Eau efficace	161
Glenium Sky 537	9 (litres)

L'affaissement mesuré au cône d'Abrams du béton C60/75 utilisé pour l'exécution du radier et des raidisseurs et fabriqué par la centrale de chantier de Léon Grosse (Tableau 1) a été en moyenne de 230 mm.

Le béton C60/75 a été mis en œuvre sur la période allant de fin 2011 au début de 2012, donc en hiver, ce qui fut favorable pour limiter les élévations de température et la maîtrise de la réaction sulfatique interne. Ce béton servant également à la construction des autres bâtiments du site a utilisé les granulats disponibles ; malgré son dosage relativement important en ciment (dont la chaleur d'hydratation atteignait 282 J/g) les conditions d'exécution en hiver ont conduit à des températures qui sont restées limitées :

- Température maximale observée dans le radier de 40 cm : 32-33°C
- Température maximale observée dans les Raidisseurs de 60 cm : 39-40°C
- Température maximale observée dans les Raidisseurs de 110 cm : 45°C

A noter que les conditions hivernales et le souhait de ne pas dépasser un gradient de température supérieur à 15°C, voire 25°C à l'extrême, ont nécessité l'emploi de bâches thermiques pour éviter une température de peau trop basse par rapport au cœur des éléments de structure. L'emploi de ces bâches a évidemment induit une légère montée en température supérieure sur les premiers jours de leur application.

La résistance en compression mesurée à 28 jours fut de 70,5 MPa, et à 120 jours de 78,4 MPa. Le module à 28 jours fut de 36.5 GPa et le retrait total à 28 jours de 248 µm/m compte tenu de la cure avec protection thermique.

### III.3 De janvier à avril 2012

Les raidisseurs verticaux du caisson d'épaisseur 60 cm ont été coulés selon le phasage présenté sur la figure 18 ; 1050 m<sup>3</sup> de béton C60/75 et 290 tonnes d'acier ont été utilisés, ce qui correspond à un ratio d'armatures de 275 kg/m<sup>3</sup>. Les figures 19 à 22 illustrent le début de l'exécution des raidisseurs avec des photos prises le 23 décembre 2011. Les figures 23 et 24 montrent l'avancement en simultané des autres structures du chantier.

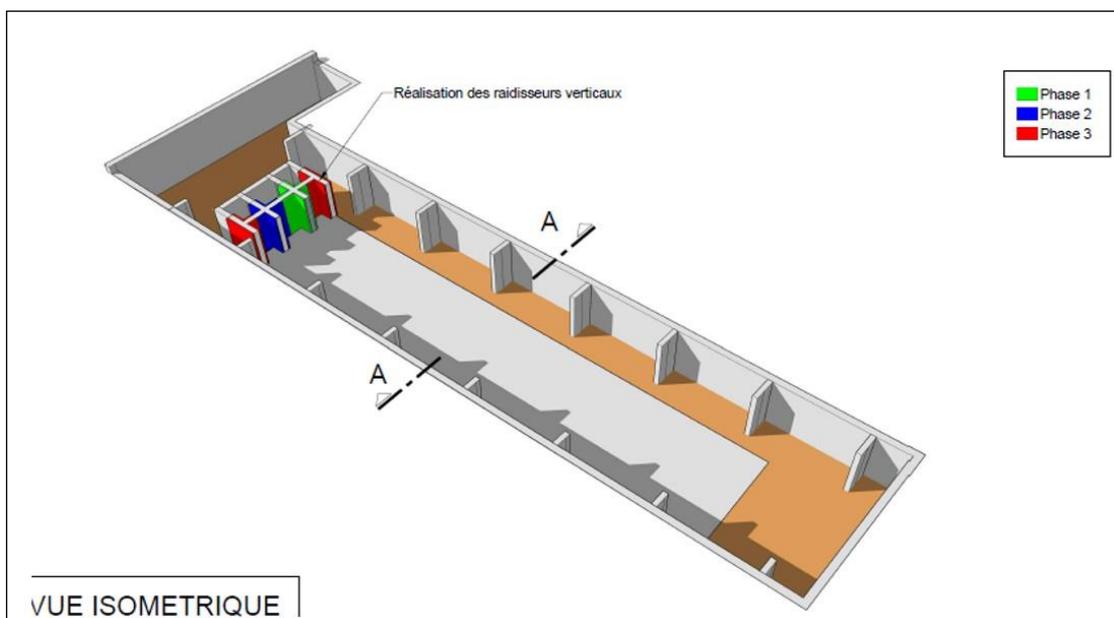


Figure n°18 : Exécution du radier et des raidisseurs



Figure n°19 : Fin du bétonnage du radier avec surfacage en cours.



Figure n°20 : Installation du ferrailage des premiers raidisseurs.



Figure n°21 : Installation des premières banches pour le coulage des raidisseurs.



Figure n°22 : Détail du ferrailage d'un raidisseur autour d'un trou d'homme.



Figure n°23 : Début de la construction des laboratoires contigus à la PFES qui est visible sur la droite de la photo (23/12/2011).



Figure n°24 : Début de la construction de la dalle vague qui va recouvrir la PFES – vue des poteaux support (23/12/2011).

Sur la figure 22, on aperçoit au fond la centrale de fabrication du béton montée par l'entreprise pour la construction de la PFES.

La figure 25 montre l'avancement des raidisseurs au 18 janvier 2012, et la figure 26 l'avancement du chantier au 20 juin 2012.



Figure n°25 : avancement de la construction des raidisseurs.



Figure n°26 : Les raidisseurs sont bétonnés, les poteaux support de la toiture sont fabriqués.

### III.3 De mai à décembre 2012

La dalle supérieure du caisson a été exécutée après que la dalle vague a été construite. Le béton mis en œuvre pour réaliser la dalle supérieure est un C80/95 dont la composition a été étudiée en détail et qui fait l'objet d'une présentation par la suite.

Les figures 27 à 29 (photos prises le 20 juin 2012) montrent le coffrage de la dalle supérieure ; ce coffrage est particulier car il nécessite un étaielement lourd dans chaque cellule et un coffrage avec double plaque de contreplaqué de façon à pouvoir reprendre les charges induites par la masse de béton de la dalle supérieure ainsi que par l'étaielement de la dalle vague servant de toiture à la PFES. En effet l'entreprise avait décidé de construire la dalle vague au-dessus de la PFES avant la réalisation de la dalle supérieure afin de bénéficier d'un environnement protecteur vis-à-vis des effets thermiques et des intempéries pour le coulage de la dalle supérieure de la PFES qui était une opération critique. La figure 30 montre que la

construction des bureaux et des salles de stockage de la PFES est en cours, tandis que la figure 31 montre que la dalle vague Est est arrivée au niveau de la PFES (photos prises le 20 juin 2012).

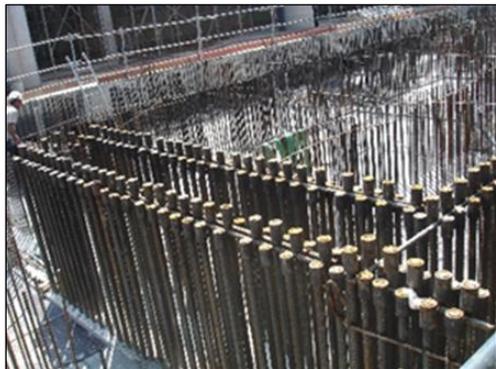


Figure n°27 : Armatures en attente avec coupleurs du mur de réaction transversal.



Figure n°28 : Vue générale de l'installation du coffrage de la dalle supérieure du caisson.



Figure n°29 : Armatures en attente avec coupleurs du mur de réaction longitudinal.



Figure n°30 : Construction des bureaux (en haut) et des salles de stockage (en bas) de la PFES.



Figure n°31 : Dalle vague Ouest en cours de ferrailage et arrivée de la dalle vague Est au niveau de la PFES.

Le 30 août 2012, la dalle vague au-dessus de la PFES est terminée (figure 32), et les étaitements de cette dalle vague ont été démontés (figure 33). En parallèle, début septembre 2012, l'entreprise décide de couler deux plots d'essai, le second plot ayant une formulation de béton modifiée par rapport à celle du premier plot avec modifications du sable et de la teneur en eau. Ces plots ont pour objet de tester le bétonnage de la dalle et vérifier le bon positionnement des puits et du ferrailage (figures 34 à 37) pour s'assurer de la bonne réalisation du hourdis supérieur de la dalle d'essai. La présence de bulles et de «nids de cailloux» ayant été constatée dans le béton du premier plot d'essai, ces défauts ont été corrigés lors du coulage du second plot d'essai.



Figure n°32 : Couverture de la PFES par la dalle vague.



Figure n°33 : Etat général de la PFES.



Figure n°34 : Plot d'essai pour tester le bon positionnement des puits.



Figure n°35 : Ferrailage en cours d'installation dans le second plot d'essai.



Figure n°36 : Bétonnage en cours du second plot d'essai.



Figure n°37 : Fin du coulage du second plot d'essai.

Afin de minimiser les conséquences du retrait, l'exécution de la dalle a été effectuée en 5 plots, en alternant le coulage des plots selon la figure 38 ; ce type de phasage ressemble au « pianotage » utilisé pour la construction des dalles de ponts mixtes.

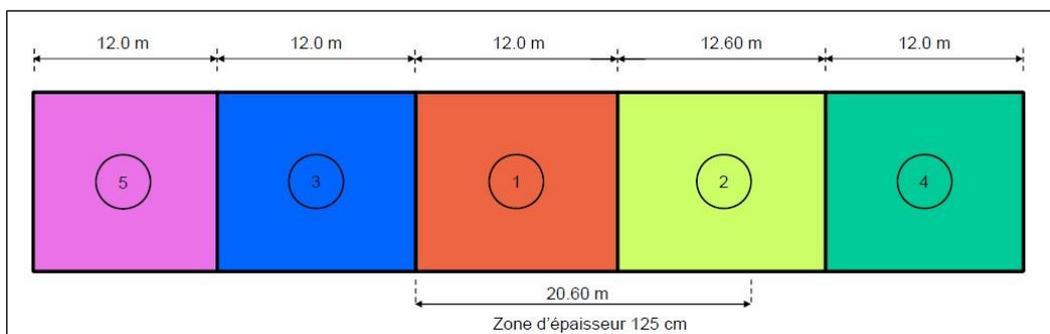


Figure n°38 : phasage de construction par plots de la dalle supérieure de la PFES

Les cornières basses ont été aussi utilisées pour le calage des nappes inférieures de ferrailage et les UPN haut pour le calage des nappes supérieures, évitant ainsi l'utilisation de cales à béton dans la dalle. Compte tenu de la forte densité de ferrailage, les recouvrements d'armatures étaient proscrits, et la longueur des barres HA était égale à la longueur du plot de coulage et au besoin les assemblages de barres se faisaient avec des coupleurs.

Le ferrailage de la dalle supérieure est le suivant (*figures 39 et 40*) :

- Zone d'épaisseur 90 cm :

- Nappe supérieure longitudinale : deux lits de 10HA32/ml
- Nappe inférieure longitudinale : un lit de 10HA32/ml et un lit de 10HA25/ml
- Nappe supérieure transversale : un lit de 10HA25/ml
- Nappe inférieure transversale : un lit de 10HA25/ml

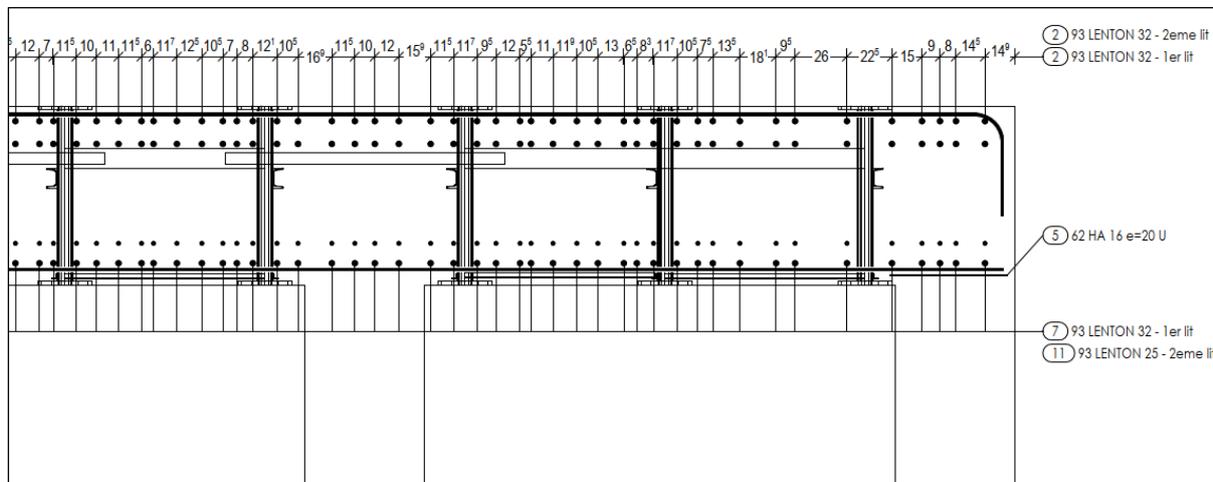


Figure n°39 : Ferrailage de la dalle supérieure dans la zone d'épaisseur 90 cm

- Zone d'épaisseur 125 cm :
  - Nappe supérieure longitudinale : deux lits de 10HA32/ml et un lit de 10HA25/ml
  - Nappe inférieure longitudinale : idem nappe supérieure
  - Nappe supérieure transversale : un lit de 10HA25/ml
  - Nappe inférieure transversale : un lit de 10HA25/ml

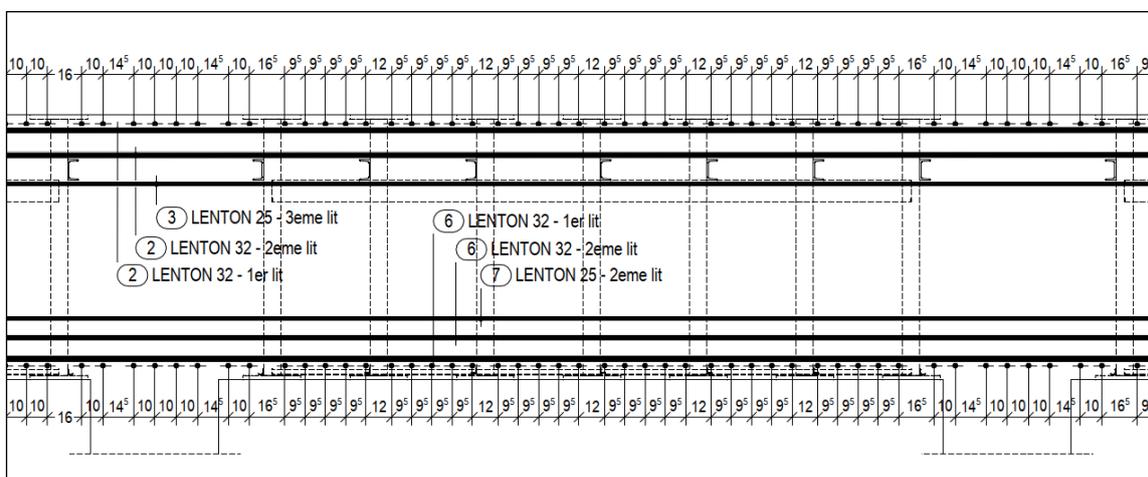


Figure n°40 : Ferrailage de la dalle supérieure dans la zone d'épaisseur 125 cm

Au total, plus de 645 m<sup>3</sup> de béton C80/95 et 250 tonnes d'armatures passives ont été utilisés pour exécuter la dalle supérieure. Le ratio d'aciers ainsi atteint était de 390 kg/m<sup>3</sup>. Ces sections d'armature représentent longitudinalement 1.79% et 1.18% d'acier, respectivement pour la zone d'épaisseur 90 cm et 125 cm, et transversalement 1.09% et 0.78%, respectivement pour la zone d'épaisseur 90 cm et 125 cm.

Le schéma de la figure 41 montre l'outil de type pont-roulant développé par Léon Grosse et utilisé pour positionner avec précision les assemblages de puits. Au préalable, un traçage des axes longitudinaux et transversaux dans chaque cellule a été effectué par un géomètre de même qu'un traçage des axes sur chacune des platines ; en complément, une herse de positionnement des puits avec pions de centrage a été mise en œuvre avant d'assembler les lots de puits par soudure d'UPN en haut et de cornières en bas,

avec herse de contrôle toujours en place. La figure 42 montre l'installation des puits d'ancrage dans le plot 4 de la dalle.

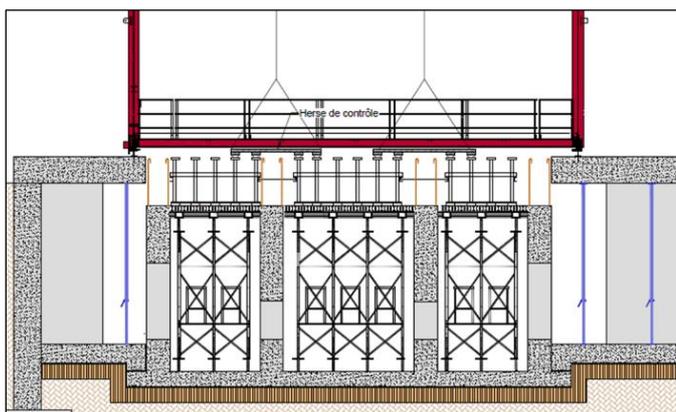


Figure n°41 : Outil de type pont-roulant et herse de contrôle.



Figure n°42 : Installation des puits d'ancrage dans le plot 4.

Les photos prises le 25/10/2012 montrent le ferrailage du plot 2 (figure 43), la protection des armatures en attente des murs de réaction (figure 44), la densité très importante des armatures à l'encastrement des murs sur la dalle (figure 45), l'installation des puits dans le plot 5 d'extrémité (figure 46), l'étalement du béton de 500 mm mesuré au cône d'Abrams pour le plot 2 (figure 47), le bétonnage et la vibration du second plot (figure 48) et le coulage des nombreuses éprouvettes de contrôles et des éprouvettes conservatoires pour l'IFSTTAR (figures 49 et 50).



Figure n°43 : Ferrailage du plot 2.

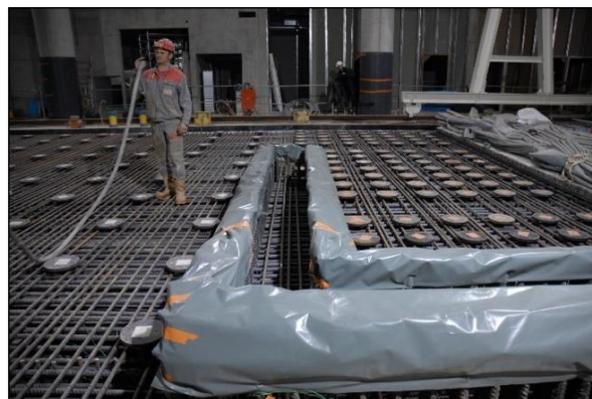


Figure n°44 : Protection des armatures en attente des murs de réaction.



Figure n°45 : Densité très importante des armatures à l'encastrement des murs sur la dalle.



Figure n°46 : Puits installés dans le plot 5.



Figure n°47 : Etalement de 500 mm.



Figure n°48 : bétonnage et vibration du plot 2.



Figure n°49 : Fabrication des éprouvettes de contrôle du plot 2.



Figure n°50 : Coulage d'éprouvettes 7 x 7 x 28 cm.

Les bétonnages des plots ont tous été effectués de nuit pour minimiser les effets thermiques. Afin de maintenir le béton dans un environnement propice à sa prise, celui-ci a fait l'objet d'une cure très soignée. Celle-ci a été effectuée en plusieurs étapes au vu de la durée de coulage exceptionnelle de chaque plot de la Dalle d'Essai : 12 heures environ en continu. Tout d'abord durant la phase de coulage, des opérateurs ont vaporisé un anti-évaporant MasterKure 111 CF sur chacune des couches de béton coulé afin de maintenir un certain taux d'humidité utile sur ce béton (figure 51).

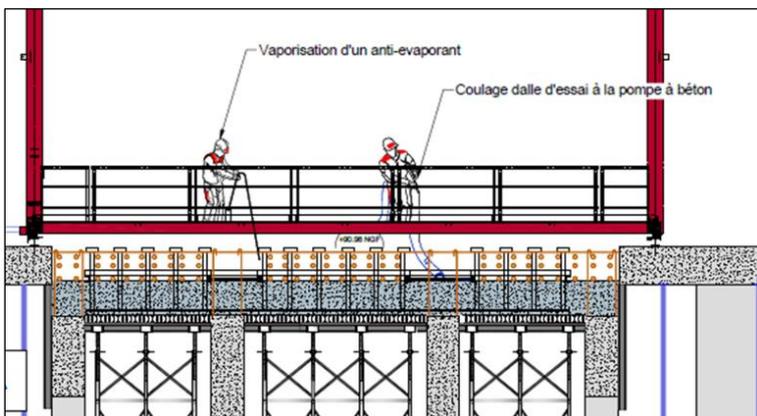


Figure n°51 : Vaporisation d'un anti-évaporant pendant le bétonnage



Figure n°52 : Système de brumisation

Dès la fin du coulage du plot de la Dalle d'Essai, l'anti-évaporant pur a été appliqué à refus une dernière fois sur le béton, puis un système de barres de brumisation a été mis en place pour produire un brouillard d'eau (figure 52) afin d'avoir une couche d'eau en surface pendant les 24 premières heures. Ces barres brumisantes ont aussi servi de support pour la mise en œuvre d'une double bâche (figure 53) pendant au minimum 2 jours pour maintenir la chaleur du béton en surface pendant sa montée en température (à titre d'exemple, le pic de température a été atteint au bout de 36 heures sur le plot 1 avec une température maximale de 49°C au cœur de la dalle). Après 2 jours, l'une des 2 bâches était retirée afin d'évacuer cette chaleur et laisser le béton redescendre en température progressivement. La dernière bâche était retirée dès que la cure et le retrait thermique du béton étaient terminés, soit au bout de 4 à 6 jours en fonction des gradients de température mesurés entre le cœur et la peau de la dalle (figure 54). Toutes ces dispositions avaient pour objectif d'uniformiser autant que possible les températures au sein de la dalle, d'appliquer une cure soignée du béton et par conséquent de minimiser les effets des retraits thermiques et hydriques.



Figure n°53 : Mise en œuvre de la double bâche.

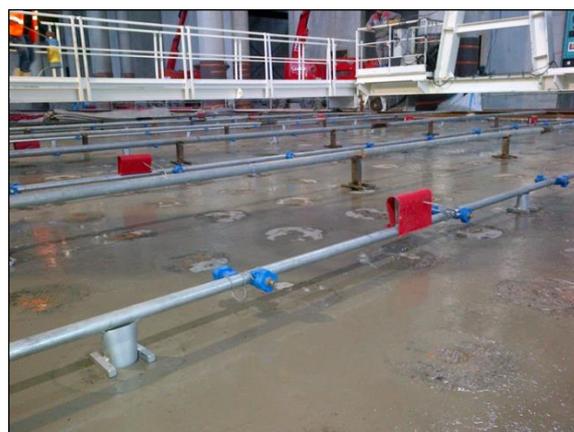


Figure n°54 : Cure en cours après enlèvement des bâches.

### III.4 De janvier à mars 2013

De janvier à mars 2013 a eu lieu l'installation des poteaux métalliques support des ponts-roulants, la pose des ponts roulants (figures 55 et 56, photos prises le 14/01/2013) et l'exécution des deux murs de réaction.



Figure n°55 : Fin de construction de la dalle et pose des ponts roulants.

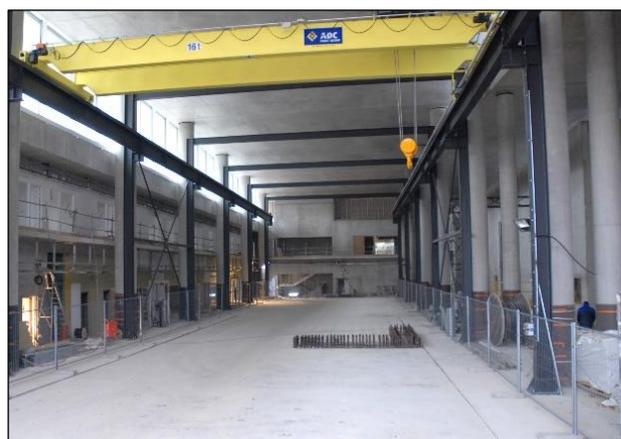


Figure n°56 : Vue des coupleurs en attente avant l'exécution des murs de réaction.

Ces deux murs sont encastrés dans la dalle d'épaisseur 125 cm, au droit des raidisseurs d'épaisseur 110 cm. Les dimensions des ailes sont de 5m en longueur par 5m en hauteur et 110 cm d'épaisseur. Ces murs

ont fait l'objet d'une modification importante de leur structure lors de leur exécution. En effet, les études détaillées effectuées par l'entreprise ont montré que la solution prévue au DCE avec un coulage en BFUP (module d'Young de 60 GPa) pour assurer une flèche horizontale en tête limitée à 1 mm dans les cas de charge critiques) était très difficile à obtenir. Cette solution en BFUP posait des problèmes de bétonnage et le coulage de pièces très épaisses en BFUP pouvait engendrer des échauffements considérables avec des risques de fissuration à la clé. Plusieurs autres solutions ont été étudiés :

- l'augmentation de l'épaisseur des murs : solution qui amenait à supprimer une rangée de puits de la dalle ;
- le recours à des granulats lourds importés (granulats d'hématite) pour augmenter le module de déformation, solution très onéreuse, techniquement risquée, et dont le délai d'étude était incompatible avec la durée du chantier ;
- l'installation d'une peau métallique de 1 ou 2 cm d'épaisseur qui permettait de maintenir l'humidité du béton, de rigidifier le mur tout en conservant une formulation de béton C80/95 avec fumée de silice, solution la plus économique et de faisabilité avérée.

C'est cette dernière solution qui fut retenue. Cette peau métallique avec sa prise en compte dans le calcul de rigidité permet de remplacer le BFUP par un béton C80/95 afin de respecter les critères de sollicitations et de déformations demandés dans le CCTP. Après réalisation des études d'exécution, il est donc retenu un mur d'épaisseur totale 110 cm, incorporant des tôles d'acier d'épaisseur 15 mm et 4 rangs d'armature HA 40 de chaque côté de la section (voir figure 57) espacés d'environ 15 cm. La fermeture en partie supérieure du mur est réalisée par une tôle métallique en " L " soudée aux tôles verticales.

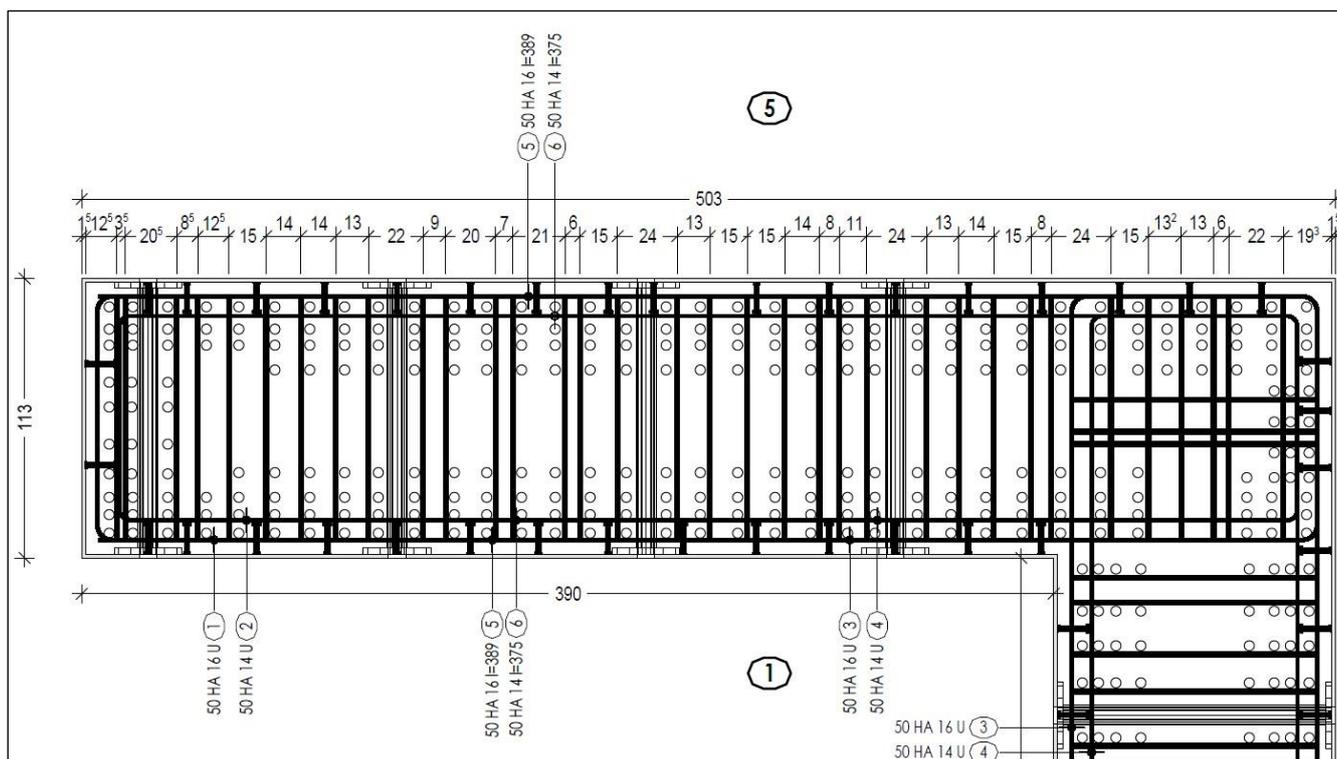


Figure n°57 : Positionnement des barres et des connecteurs dans les murs de réaction

Le béton utilisé est un béton C80/95 identique à celui utilisé pour la dalle, dont les caractéristiques mécaniques sont les suivantes :

- $E_{cm} = 46 \text{ GPa}$  (selon essais).
- $f_{ctk_{0,05}} = 3,4 \text{ MPa}$  (valeur Eurocode 2 [5])
- $f_{ctm} = 4,8 \text{ MPa}$  (valeur Eurocode 2 [5])
- $\alpha = 0,65 \cdot 10^{-5}$  (coefficient de dilatation thermique selon essais)

Le système utilisé pour ancrer la tôle de peau au béton est constitué de goujons de type Nelson de diamètre de tige 26 mm et disposés selon un maillage de 150 mm par 150 mm.

Le ferrailage (barres verticales) du mur d'essai est constitué de 4 lits HA 40 avec un espacement de 15 cm par face. Des armatures HA 16 et HA 14 avec un espacement de 10 cm sont utilisées horizontalement sur chaque face (figure 57).

Les figures 58 à 63 illustrent les étapes de construction des murs qui ont nécessité au total 50 m<sup>3</sup> de béton C80/95 et 30 tonnes d'armatures, ce qui donne un ratio de 600 kg/m<sup>3</sup>. Quarante puits métalliques ont été intégrés au coffrage en métal des murs. A la fin du bétonnage des murs, une couverture par bâche isolante de l'arase supérieure a été mise en place pour maintenir la température. Enfin une tôle d'acier a été soudée au-dessus des murs.



Figure n°58 : Installation de la peau métallique avec ses connecteurs, et les puits d'ancrage des murs de réaction.



Figure n°59 : réglage fin des puits horizontaux.



Figure n°60 : Ferrailage des murs

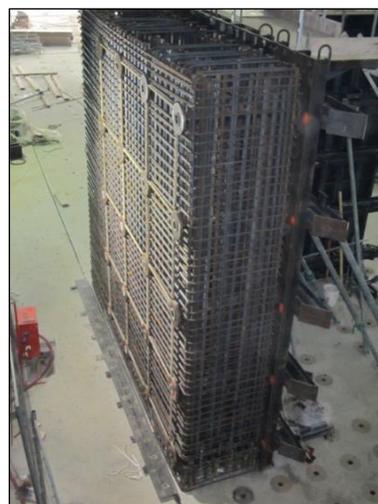


Figure n°61 : Vue sur tranche du ferrailage



Figure n°62 : Fermeture du coffrage des murs



Figure n°63 : Fin du bétonnage des murs (27/02/2013).

### III.5 De mars à septembre 2013

Pendant cette période a lieu la mise en place des platines supérieures, puis la réalisation de la chape.

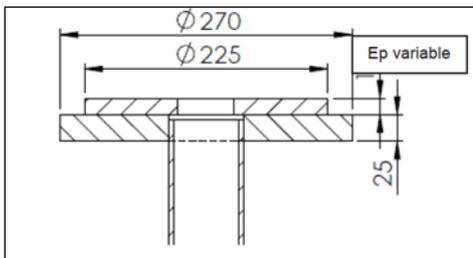


Figure n°64 : Coupe des platines

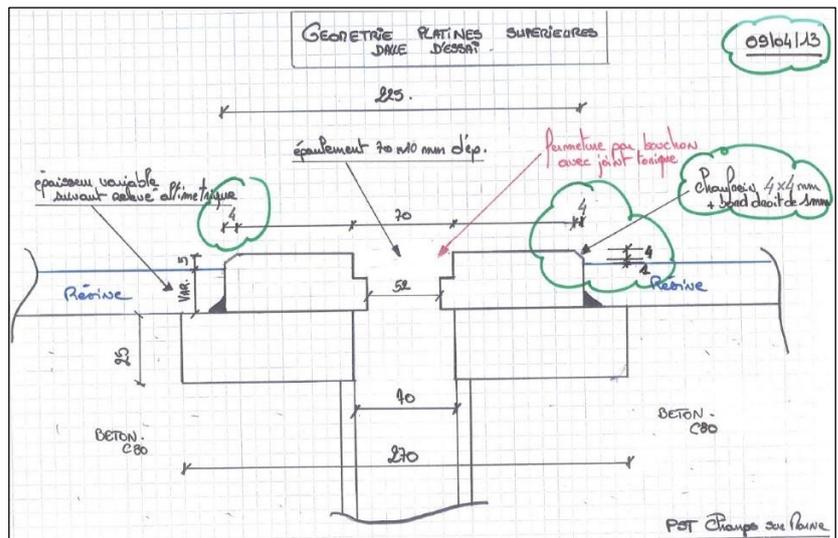


Figure 65 : Schéma pour l'exécution des platines

Des platines de diamètre 225 mm et d'épaisseur variable (suivant relevé altimétrique) ont été fixées par soudage au-dessus des platines supérieures des puits (figures 64 et 65). Ces platines dont la précision de pose est très stricte, ont pour fonction de guider les barres de meccano qui sont enfoncées dans les puits, de servir de base au bridage des dés du meccano, d'assurer un plan parfaitement horizontal de référence pour les montages d'essais et de recevoir un bouchon de fermeture.

Pour implanter ces platines, l'entreprise a utilisé une seconde herse (de précision) pour positionner ces platines dans les directions longitudinales et transversales (figure 65). L'épaisseur des platines a été adaptée pour obtenir une bonne altimétrie. Une fois les platines bien positionnées, elles ont fait l'objet d'un pointage par soudure sur les puits, puis on a procédé au soudage sur toute leur périphérie.

Les contrôles d'implantation des 822 puits ont été réalisés par série en plusieurs fois du 26/04/2013 au 13/06/2013 par le géomètre de l'entreprise ; que ce soit en position longitudinale ou transversale, les écarts moyens étaient aux alentours de 0,5 mm avec des écarts maximaux de 1 mm pour quelques puits.

Ces contrôles seront détaillés dans un second article publié dans un prochain numéro du Bulletin Ouvrages d'Art.

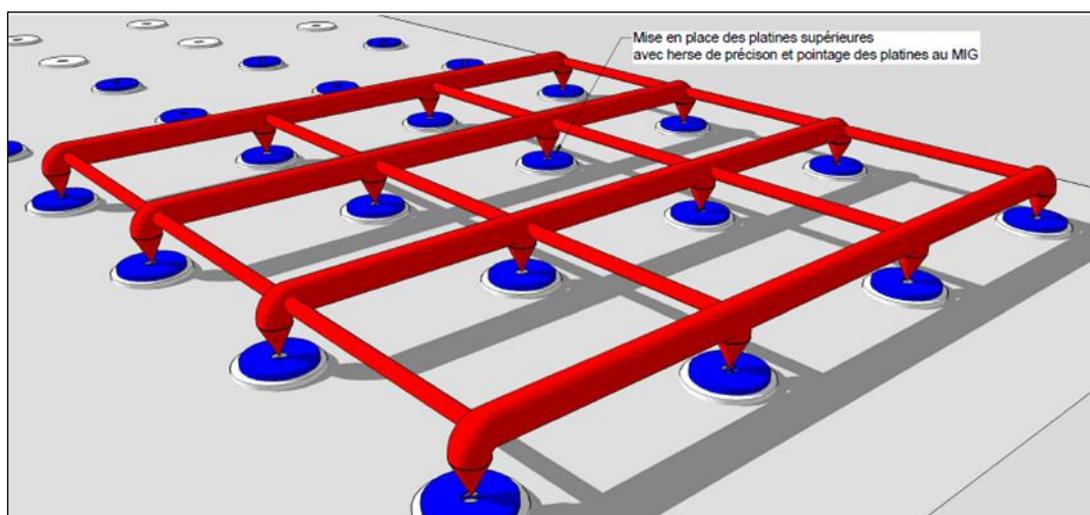


Figure n°66 : Herse de précision utilisée pour positionner les platines supérieures.

La chape à base de résine mise en œuvre sur l'ensemble de la dalle supérieure avait pour objectif de ralentir très fortement la dessiccation du béton de la dalle afin d'éviter des fissurations par retrait ; elle devait également résister aux chocs provoqués par la chute d'objets sur la dalle et être fortement antidérapante, car l'usage d'une dalle d'essais peut amener à avoir des fuites d'huile hydraulique. Ces critères ont conduit à choisir un revêtement de la dalle d'essai composé d'un système de 3 couches : une première couche de 5 mm de Sikafloor 156, une seconde couche de 5 mm de Sikafloor 161 pur puis une troisième couche de 5 mm de Sikafloor 266 CR (figure 67).

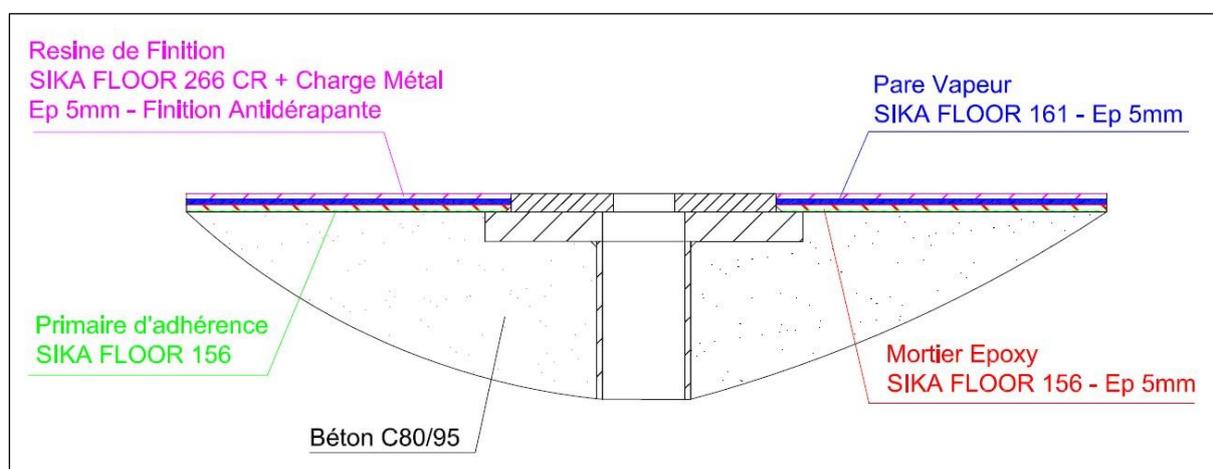


Figure n°67 : structure de la chape mise en œuvre en surface de la dalle

Le Sikafloor 156 est une couche de fond bicomposante à base de résine époxy destinée à recevoir les revêtements de sol Sika, et est utilisée ici comme une couche d'accrochage sur le béton. Le Sikafloor 161 est une résine époxydique à deux composants polyvalente utilisée ici en tant que Pare Vapeur et primaire pour recevoir la couche de Sikafloor 266 CR. Le Sikafloor 266 CR est une résine époxydique bicomposante à faible émission pour revêtement auto-lissant, structuré ou filmogène, recommandé comme revêtement pour les magasins et les entrepôts de stockage. Cette couche a été chargée avec des particules de métal de façon à avoir une résistance améliorée aux chocs d'objets, puis elle a été sablée de manière à obtenir

un revêtement anti-dérapant. A noter que le procédé Sikafloor métal d'épaisseur 4 mm fait l'objet d'un procès-verbal de classement performantiel du CSTB.

Le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau d'un matériau,  $\mu$ , qui est le rapport de la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air sur sa propre perméabilité à la vapeur d'eau, était respectivement de 4 860 et 69 857 pour le Sikafloor 161 et le Sikafloor 266CR.

## IV. Conclusion

Nous venons d'examiner les principes adoptés pour la construction de la plateforme d'essais des structures de l'IFSTTAR (intégrée depuis à l'Université Gustave Eiffel), ainsi que le cahier des charges établi pour pouvoir concevoir cette structure, les hypothèses prises pour sa conception et le déroulement détaillé du chantier de construction. Lors de l'exécution, des ajustements ont été rendus nécessaires comme l'optimisation des formules de béton, la réalisation de plots d'essai pour tester le bétonnage de la dalle supérieure, l'amélioration de l'outil de type pont-roulant développé par Léon Grosse pour positionner avec précision les assemblages de puits complété par une herse de positionnement des puits avec pions de centrage, l'exécution de la dalle supérieure en 5 plots par « pianotage », le contrôle de la température du béton et sa cure soignée pour minimiser les effets des retraits thermiques et hydriques, et la modification de la structure des murs d'essais avec utilisation de nombreux coupleurs d'armatures passives à l'encastrement des murs sur la dalle.

Dans un second article à paraître dans un prochain numéro du Bulletin Ouvrages d'Art, nous décrivons les essais de réception de la PFES et insisterons sur deux points techniques importants de la construction dont la résolution fut indispensable pour aboutir à la mise en service d'un équipement exceptionnel et parfaitement fonctionnel : il s'agit des études conduites pour mettre au point une formulation optimisée du béton C80/95 afin de limiter les effets du retrait au jeune âge du béton et prévenir toute fissuration prématurée, et des difficultés rencontrées pour assurer une pose correcte en sous-face de la dalle des écrous nécessaires à la bonne réalisation des montages d'essai.

## V. Références bibliographiques

- [1] Diruy M. « *L'installation d'essais de structures du LCPC* », Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°94, mars-avril 1978, Réf 214.
- [2] Toutlemonde F. "Large model testing as a powerful tool for improved design of concrete structures : the LCPC experience", in Structural Assessment. The role of large and full-scale testing, K.S. Virdi et al. Eds, E&FN SPON, 1997, pp. 577-585.
- [3] Toutlemonde F., Quiertant M., Dubroca S., Petit F. « Justification du renforcement des voussoirs préfabriqués des tunnels : expérimentation sur voussoirs en béton armé et béton de fibres », *Tunnels et Ouvrages Souterrains*, 2000, n°162, pp. 333 – 341, décembre.
- [4] Norme AFNOR NF EN1992-1-1 - Calcul des structures en béton, Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. Octobre 2005.
- [5] Norme AFNOR NF EN 1992-2 - Calcul des structures en béton, Partie 2 : Ponts en béton — Calcul et dispositions constructives. Mai 2006. (Eurocode 2 Ponts)
- [6] Norme AFNOR NF EN 1994-1-1 - Calcul des structures mixtes acier-béton, Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments Eurocode 4. Juin 2005. (Eurocode 4)

[7] Norme AFNOR NF EN 1993-1-1 - Calcul des structures en acier, Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. Octobre 2005 (Eurocode 3)

Maîtrise d'ouvrage : MEEDTL

Conducteur d'opération : DDE 77.

Cahier des charges : LCPC, puis IFSTTAR

Maîtrise d'œuvre : bureau d'études SNC-Lavalin, associé à l'agence d'architecture Pargade,

Appui calcul maîtrise d'œuvre : NECS

Bureau de contrôle : DEKRA

Etudes d'exécution : bureau d'études structure CTE

Réalisation gros oeuvre: entreprise Léon Grosse

Pose des écrous des puits : Baudin Chateauneuf

Réalisation fondations : Spie fondations

Contrôle extérieur : CETE IDF et CETE Nord-Picardie

**REMERCIEMENTS** : Les auteurs souhaitent remercier de nombreux autres participants à la construction de la PFES :

S. Guarnera (Directeur de Projet, Léon Grosse), M. Plazzotta (Directeur de Travaux, Léon Grosse), G. Lamarque (Directeur du département Génie Mécanique, Baudin Chateauneuf), J.M. Ginefri (MEEDDM, Maître d'ouvrage), M. Bancharam (DDE 77, conducteur d'opération), A. Nicolas (SNC LAVALIN, Maître d'oeuvre), C. Bonifas (Cerema Nord-Picardie, Contrôle extérieur), G. Chevin (Cerema Ile de France, Contrôle extérieur), P. Leguen (DEKRA, Bureau de contrôle), M. Pargade (Architecte), V. Motyka (IFSTTAR, Directeur adjoint), R.-P. Martin (IFSTTAR, en charge de l'équipe technique de la PFES), F. Baby (IFSTTAR, ingénieur de recherche dans l'équipe de la PFES), J.-C. Renaud (IFSTTAR, technicien supérieur métrologue de l'équipe de la PFES), J. Billo (IFSTTAR, technicien supérieur de l'équipe de la PFES).

# Les apports de l'imagerie et de la reconnaissance des formes pour la gestion de patrimoine des ouvrages d'art

## *Partie 1 – recensement et identification des ouvrages*

**Constantin Ruellet<sup>1</sup>, Pierre Charbonnier<sup>2</sup>, Philippe Foucher<sup>2</sup>, Christophe Heinkele<sup>2</sup>, Hervé Davias<sup>3</sup>, Thibaut Perrin<sup>4</sup>, Adrien Dodane<sup>5</sup>**

*1 Cerema DTecITM, Directeur adjoint du CNPS, 62 rue de la Gare, Verneuil-l'Étang, Responsable d'études gestion de patrimoine ouvrages d'art à ITM/DGIPI au moment de l'étude*

*2 Cerema Agence de Strasbourg / Groupe ENDSUM, 11 rue Jean Mentelin, Strasbourg*

*3 Cerema Agence d'Angers / Groupe Ouvrages d'Art, 23 Av. Amiral Chauvin, 49130 Les Ponts-de-Cé*

*4 Cerema Agence de Strasbourg / Groupe Ouvrages d'Art, 11 rue Jean Mentelin, Strasbourg*

*5 DREAL Bourgogne Franche-Comté Service Transports et mobilités, 5 voie Gisèle Halimi, Besançon*

---

## Résumé

Le Cerema mène une réflexion sur les perspectives d'évolution de la gestion patrimoniale des ouvrages d'art au travers de l'intégration des technologies numériques de l'imagerie et de la reconnaissance de forme. Cette réflexion s'est d'abord traduite par une production orientée sur la maîtrise d'œuvre, ayant fait l'objet d'un article dans le Bulletin OA n°81 de janvier 2023. Ensuite, la réflexion s'est portée sur la gestion patrimoniale des ouvrages d'art. Ce champ étant très vaste, seuls les apports envisageables de ces technologies pour le recensement, les visites et les diagnostics d'ouvrages ont été considérés.

Les technologies évoquées et leur utilisation dans le domaine des ouvrages d'art relevant encore majoritairement de la recherche et de l'expérimentation, le travail réalisé ici a été de dresser un état des lieux de la faisabilité d'une part et du calendrier des solutions d'autre part, à chaque fois que cela était possible.

La réflexion présentée dans cet article sera celle menée sur le recensement des ouvrages d'art, à savoir détection, reconnaissance et caractérisation des ouvrages. Cet article n'aborde ni l'optimisation de la gestion d'un parc d'ouvrage ni la durabilité des ouvrages. La gestion des données et les modes de traitement qui en sont faits ne sont pas traités dans cet article (base de données, bigdata, crowdsourcing...).

## I. Introduction

Le patrimoine français d'ouvrages d'art représente environ 230 000 ponts routiers et 300 000 murs de soutènement. La valeur patrimoniale des ouvrages routiers, c'est-à-dire leur coût de reconstruction à neuf, est estimée entre 200 et 250 milliards d'euros. Or, ce patrimoine présente depuis plusieurs années diverses problématiques. Tout d'abord, comme souligné dans le rapport sénatorial de 2019 sur la sécurité des ponts [1], le patrimoine français est mal recensé et de nombreux gestionnaires (essentiellement au sein des collectivités territoriales de petites et moyennes tailles) ne connaissent pas tous les ouvrages dont ils ont la charge. Cette situation s'améliore puisque depuis 2021, le Programme National Pont, issu du plan de relance post pandémie, a permis à de nombreux gestionnaires de mieux connaître leur patrimoine. Ce patrimoine est vieillissant, ce qui engendre des dégradations plus rapides et plus importantes. Les effondrements du pont Morandi à Gênes ou du mur de culée du viaduc de Gennevilliers ont mis en lumière les risques en matière de continuité d'itinéraire et de sécurité publique d'un patrimoine en ouvrages dont l'état se détériore et l'importance d'une gestion de patrimoine de qualité.

En France, les collectivités territoriales sont gestionnaires de la très grande majorité du patrimoine. Les gestionnaires sont donc multiples et on constate une inégalité des moyens humains et financiers alloués à la gestion de leurs infrastructures dès le niveau départemental. On note également le cas des gestionnaires ayant des patrimoines réduits d'infrastructures (comme par exemple les communes de petites tailles) qui n'ont généralement pas de service dédié à la gestion des ouvrages d'art et pas non plus de compétences techniques particulières dans le domaine. Enfin, il existe plusieurs méthodes d'évaluation et de gestion d'un patrimoine en ouvrages d'art, comme par exemple la méthode IQOA<sup>1</sup> [2],[3], VSC<sup>2</sup>[4] ou la méthode départementale [5]. Cette diversité technique engendre une certaine complexité pour comparer les patrimoines d'un gestionnaire à l'autre et pour créer des outils communs. Pour approfondir le sujet, un état des lieux complet du recensement, des méthodes de gestion et de l'état des ouvrages d'art français est dressé chaque année par l'ONR<sup>3</sup> dans son rapport annuel [6].

Dans ce contexte, la forte augmentation des applications des technologies numériques dans les différents domaines de notre société interroge les gestionnaires sur les possibilités qui s'offrent à plus ou moins long terme pour la gestion des infrastructures. On constate ainsi une utilisation de plus en plus courante de l'imagerie et de l'intelligence artificielle dans le domaine de la gestion de patrimoine d'ouvrages d'art. On peut citer les visites d'ouvrages par drone, les reconstitutions 3D d'ouvrage ou les relevés automatiques de défauts sur certains types de structures. L'engouement suscité par ces nouvelles approches est fort et on peut envisager que ces dernières puissent contribuer à répondre aux défis et aux contraintes évoqués ci-dessus. Il reste toutefois de nombreux verrous techniques et technologiques à lever et une part des applications qu'il est permis d'envisager relève du domaine de la recherche et de l'expérimentation. Dans ce contexte, un appel à projets appelé "ponts connectés", porté par le Cerema, a été lancé en 2020 dans lequel des entreprises ont proposé des projets innovants basés sur les méthodes numériques.

Ainsi, après avoir détaillé l'état des lieux des technologies utilisées, le présent article explore les apports envisageables des technologies numériques au domaine de la gestion du patrimoine d'ouvrages d'art et plus spécifiquement du recensement d'ouvrages.

## II. Etat des lieux des technologies

Les données numériques susceptibles d'être utilisées pour l'aide à la gestion de patrimoine des ouvrages d'art regroupent les images, les nuages de points, ou les données obtenues par des capteurs spécifiques

---

<sup>1</sup> *Image Qualité des Ouvrages d'Art*

<sup>2</sup> *Visite Simplifiée Comparée*

<sup>3</sup> *Observatoire National de la Route*

sur des ouvrages instrumentés. Ici, nous nous focaliserons plus particulièrement sur les images de tous types ou les données issues de capteurs laser ou sonar permettant de collecter des nuages de points.

Nous proposons de faire un état des lieux de ces techniques d'imagerie à travers trois grands axes : l'acquisition des données, l'exploitation des images ou des nuages de points pour de la visualisation et des mesures et les méthodes d'analyse automatique basées sur l'intelligence artificielle.

## II.1 Acquisition des données

De nombreux matériels de pointe existent pour acquérir des données numériques pour l'aide à l'inspection d'ouvrages. A l'heure actuelle, des caméras haute résolution et/ou des scanners laser sont utilisés principalement à des fins d'illustration et d'inventaire mais les données sont encore peu prises en compte pour l'inspection en tant que telle. Les rendus visuels des zones explorées sont de très bonne qualité et permettent de mettre en évidence la présence éventuelle de certains désordres. Des mesures 3D (relevés de nuages de point par télédétection laser) très précises peuvent également être effectuées, par exemple pour connaître et suivre l'évolution géométrique de la structure. Les matériels sont en constante évolution, ce qui améliore la qualité des données en matière de netteté et de précision.

Les acquisitions 3D peuvent être enrichies par des images issues de capteurs non destructifs plus spécifiques. Parmi ceux-ci, les caméras infrarouges sont employées relativement couramment et permettent d'observer des variations de température à la surface d'une infrastructure. Les images obtenues peuvent par exemple mettre en évidence des différences de température, souvent caractéristiques de problèmes d'étanchéité ou d'infiltrations. Moins souvent utilisés que les autres capteurs, les radars permettent de visualiser la structure interne d'un ouvrage sur une certaine profondeur et apporter des éléments supplémentaires pour expliquer l'état de l'infrastructure, en lien avec l'analyse de la surface. L'utilisation des capteurs radar requiert cependant une connaissance technique des matériels pour répondre aux besoins de l'inspection.

Dans le cas d'ouvrages semi-immergés, l'état de la zone à inspecter sous l'eau ne peut être visualisé directement par des moyens conventionnels, d'autant plus quand l'eau est turbide. Dans ces situations, les technologies sonar fondées sur des ondes acoustiques peuvent être choisies pour acquérir des données de la partie subaquatique. Parmi ces capteurs immergés, on peut distinguer les sonars imageurs qui enregistrent sous forme d'images la partie à analyser et les échosondeurs multifaisceaux qui renvoient un nuage de points dans lequel des mesures peuvent être réalisées.

Pour effectuer des mesures à partir des images ou du nuage de points, une phase de calibrage et/ou d'étalonnage de l'appareil d'acquisition est obligatoire. Elle permet d'évaluer les paramètres géométriques et photométriques du modèle de formation des images. Pour les images visibles, le modèle inclut entre autres l'optique utilisée et le positionnement géométrique des caméras par rapport à la scène. Pour les caméras infrarouges, l'étalonnage consiste également à faire le lien entre ce que le capteur voit en terme de rayonnement et les températures relevées. La plupart du temps, ces calibrages/étalonnages sont effectués en usine mais des vérifications sur le terrain peuvent être souhaitables.

Tous ces capteurs peuvent être employés de manière statique pour obtenir avec précision des données sur une zone ciblée de l'ouvrage. Dans la mesure du possible, il est souvent intéressant d'embarquer ces appareils sur un porteur pour effectuer dynamiquement des relevés d'imagerie (visibles, IR) et/ou 3D (grâce aux techniques LIDAR) de l'ouvrage en plus grande quantité mais avec une précision un peu moindre qu'avec des capteurs statiques. Le type du porteur dépend bien entendu du besoin initial et de l'ouvrage inspecté. En embarquant les capteurs sur un véhicule roulant (mobile mapping), on peut ainsi collecter des données visibles depuis la route à grand rendement, idéalement sur une infrastructure linéaire. Embarqués sur un drone, les capteurs permettent d'obtenir des données sur des zones de l'ouvrage peu accessibles, comme par exemple des piles de ponts.

Quel que soit le mode d'embarcation des capteurs, la localisation des prises de vue au moment de l'acquisition est essentielle. Ce positionnement peut être effectué dans un référentiel national. Celui-ci est, en France, le système RGF<sup>4</sup>93, lorsqu'on s'intéresse uniquement à l'aspect topographique. Pour mesurer une altimétrie très précise, il est également possible de se positionner par rapport au réseau officiel de nivellement NGF<sup>5</sup>-IGN69 (ou NGF-IGN78 pour la Corse). Le référentiel à Grande Echelle (RGE) permet d'adjoindre des informations cartographiques, qui peuvent présenter un intérêt pour la localisation. Notons que ce dernier permet de proposer une localisation d'au moins 50 cm. D'une manière générale, les capteurs GNSS<sup>6</sup> sont les solutions les plus adaptées pour un positionnement dans le référentiel topographique national. D'éventuelles/ corrections (RTK<sup>7</sup>) et compléments (IMU<sup>8</sup>) sont appliquées selon les besoins pour une localisation aussi précise que possible.

Pour effectuer du relevé d'équipements ou de pathologies, il est parfois plus pertinent de changer d'échelle et se placer dans le référentiel de l'ouvrage. Pour cela, il est possible d'effectuer un changement de repère pour faire le lien entre les positions GNSS et les positions dans le référentiel de l'ouvrage si celui-ci est géo-référencé. L'autre solution est d'effectuer une localisation directement dans le référentiel ouvrage à partir de repères connus et implantés sur l'ouvrage et de techniques telles que l'odométrie, la triangulation ou la radiofréquence.

De nombreux matériels d'acquisition de données existent déjà et commencent à être exploités en accompagnement de l'inspection. Les campagnes d'acquisition sont le plus souvent gérées selon un protocole propre à l'ouvrage inspecté. Il pourrait être intéressant de considérer le capteur de données numériques comme un outil d'inspection à part entière et proposer des méthodologies plus systématiques de collecte de données, généralisées à différents ouvrages ou types d'ouvrages. Dans ces méthodologies, l'association de différents capteurs pourrait être proposée. Il convient cependant dans ce cas de bien prendre en compte la problématique de recalage spatial des données.

## II.2 Visualisation

Les logiciels d'exploitation des données doivent permettre de visualiser et de localiser précisément les acquisitions réalisées sur l'ouvrage, d'intégrer des fonctionnalités de saisie et d'extraction d'information et de fournir des moyens de mesure. La visualisation des données peut être envisagée directement sur site avec une tablette ou ordinateur portable de terrain, ce qui peut permettre de faciliter les saisies et les annotations, d'interpréter les images avec l'expertise *in situ* et de compléter éventuellement les acquisitions. Dans le cas d'acquisitions en dynamique, le but est plutôt de collecter des données à grande échelle sur un ouvrage pour une exploitation hors-site a posteriori de la visite.

L'intérêt de développer et d'utiliser des logiciels dédiés à l'inspection d'ouvrages, par rapport à une visionneuse d'images standard, réside dans les outils de saisie, de mesure ou d'analyse mis à disposition de l'opérateur et répondant aux besoins métiers. De tels logiciels de visualisation sont désormais relativement répandus dans le domaine. L'ajout de fonctionnalités plus avancées telles que la superposition d'images issues de différents types de capteurs (ou modalités), la modélisation globale 3D et les automatismes commencent à faire leur apparition depuis quelques années. Pour ces outils avancés, des améliorations sont néanmoins encore attendues, par exemple pour mieux recalibrer les données multimodales (issues de différents modes d'acquisition) entre elles, obtenir des modèles 3D plus précis et intégrant ces différentes modalités, arriver à un haut degré d'automatisation pour détecter des objets d'intérêt (voir section suivante). Notons que dans ce dernier cas, le logiciel de visualisation en lui-même

---

<sup>4</sup> Réseau Géodésique France

<sup>5</sup> Nivellement Général de la France

<sup>6</sup> Géolocalisation et Navigation par un système de satellites (ou Global Navigation Satellite Systems)

<sup>7</sup> Real Time Kinematic

<sup>8</sup> Inertial measurement unit (centrale à inertie)

peut être source d'amélioration des automatismes en y intégrant des possibilités d'annotation de données, souvent indispensable dans les méthodes d'intelligence artificielle basées sur l'apprentissage (voir section suivante).

La qualité visuelle des données va dépendre directement de la résolution des capteurs et des configurations d'acquisition. Dans certains cas, les images visibles sont difficilement interprétables, par exemple du fait d'une résolution trop faible, d'une luminosité ou d'un contraste trop faible ou d'un angle de vue non approprié. Il peut ainsi être compliqué de repérer des fissures trop fines ou de mettre en évidence des pertes de matière. Des traitements sur l'image peuvent améliorer sa qualité dans certains cas. L'ajout d'autres modalités peut également permettre d'améliorer le diagnostic comme le montrent les vues du même ouvrage dans le domaine du visible (Figure 1) et de l'infrarouge (Figure 2).

La précision des mesures va dépendre du capteur (notamment de son calibrage) et des conditions d'acquisition. En général, la précision des mesures est plus faible lorsque l'acquisition est dynamique par rapport à une mesure statique et/ou par rapport à des méthodes de mesure conventionnelles employées par un géomètre. Les mesures à partir d'acquisitions en dynamique auront cependant l'avantage d'être réalisables à grande échelle. Selon le besoin, ces mesures peuvent s'avérer suffisantes pour estimer un volume de matériau ou suivre des déformations majeures.

A partir des données acquises, la modélisation 3D de l'ouvrage est un rendu très avancé et avec un potentiel d'exploitation élevé. Les modèles 3D générés à partir de données laser sont obtenus en orientant les nuages de points ou profils laser (LIDAR) les uns par rapport aux autres. Les méthodes de reconstruction photogrammétrique sont utilisées pour créer un modèle 3D à partir des images. Des logiciels industrialisés (par exemple *Metashape*) existent déjà pour créer ces modèles. Notons que la visualisation 3D requiert des ressources informatiques un peu plus élevées que les moyens bureautiques usuels pour pouvoir créer le modèle, naviguer dans celui-ci et l'exploiter de manière aisée, c'est-à-dire en extraire des informations, y effectuer des mesures, etc.



Figure 1 : Visualisation de fissures et de rouille sur armatures sur l'intrados d'une dalle de ponts (Cerema)

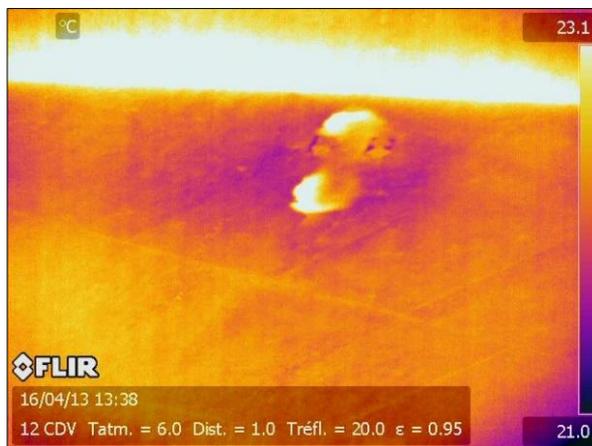


Figure 2 : Décollement de béton sur l'intrados d'une dalle de pont visible sur image IR (Cerema)

## II.3 Reconnaissance de formes

L'analyse automatique d'images ou de nuages de points 3D est envisageable à plus ou moins long terme. Associer automatiquement des données (images, portions d'images, ensemble de points...) à une catégorie au moyen d'une ou de fonction(s) mathématique(s) est un problème de reconnaissance de formes, pour lequel on distinguera trois tâches (Figure 3) : la classification de données, la détection d'objets et la segmentation. La classification consiste à affecter à l'image une catégorie sémantique. Par exemple, on renseigne automatiquement l'image comme représentant un portique. Les classes ou

catégories peuvent être plus ou moins précises. La détection consiste à indiquer la présence d'un ou plusieurs éléments d'intérêt dans l'image ou le nuage de points et à localiser ces éléments de manière grossière par exemple au moyen d'une boîte englobante. La segmentation consiste à délimiter un objet d'intérêt au pixel (pour l'image) ou au point (pour le nuage de points) près. Quelle que soit la tâche à réaliser, une phase d'apprentissage doit, dans un premier temps, être effectuée de manière à optimiser la fonction mathématique, appelée fonction de classification, à partir d'un ensemble d'exemples. L'algorithme peut ensuite être utilisé de manière à affecter automatiquement les classes à des données nouvelles, non utilisées pour l'apprentissage.

L'apprentissage est dit « supervisé » lorsque les exemples utilisés pour cette phase sont de classes connues. Sur l'ensemble d'apprentissage, l'objectif est de minimiser l'écart (selon un critère préalablement défini) existant entre la classe résultante de la fonction classifiante et la classe réelle. Cette minimisation se fait de manière itérative en ajustant petit à petit les paramètres internes de la fonction de classification. L'apprentissage est terminé lorsque le critère n'évolue qu'à la marge ou que le nombre d'itérations fixé initialement est atteint. Notons qu'il existe également un apprentissage dit « non supervisé » pour lequel les classes des exemples ne sont pas connues. Dans ce cas, l'objectif est de regrouper les échantillons qui se ressemblent en amas ou clusters, d'où le terme « clustering » souvent employé à la place de classification pour ce type d'apprentissage. Avant d'être envoyées en entrée de la fonction de classification, les données sont représentées selon un ensemble de caractéristiques adaptées à l'algorithme. Ces caractéristiques sont soit générées selon des connaissances expertes et en fonction du problème à résoudre, soit directement apprises à partir de l'ensemble d'exemples précités. Cette seconde possibilité correspond aux approches par apprentissage profond (*deep learning*) qui ont connu un essor considérable ces dernières années et donnent d'excellentes performances dans de nombreux domaines d'application. L'efficacité de ces techniques dépend du nombre et de la représentativité des échantillons pour l'apprentissage, des éléments que l'on souhaite reconnaître et de la complexité des images.

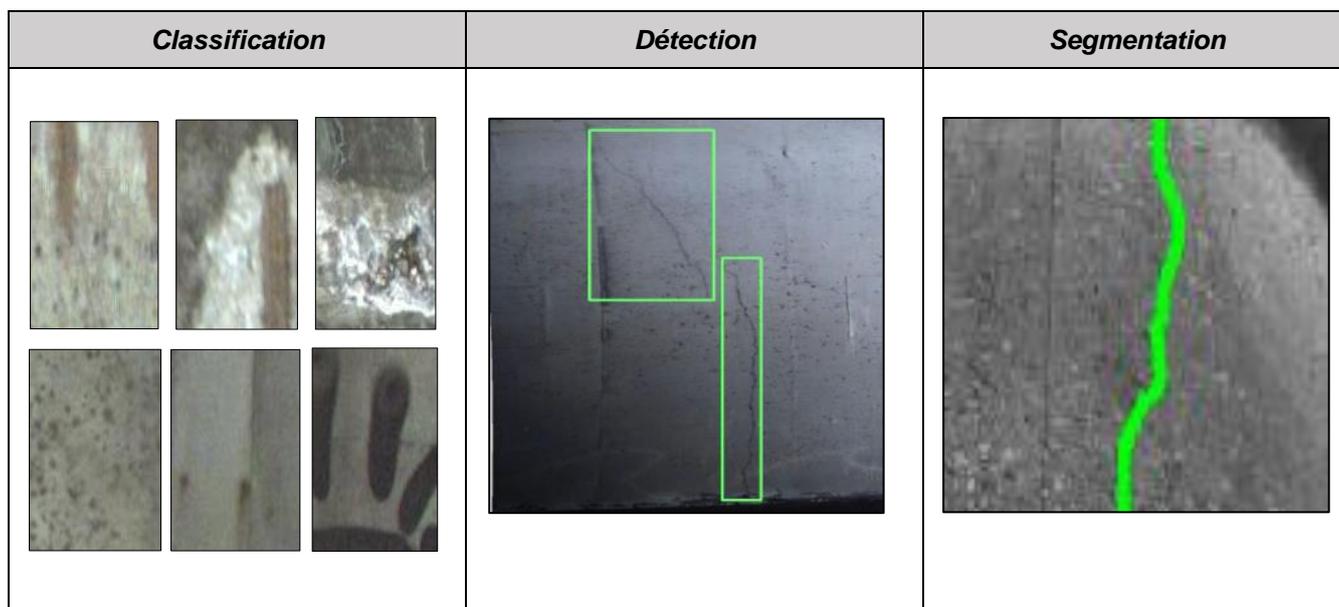


Figure 3 : Application de méthodes de reconnaissance de formes sur des images de parements d'ouvrages : classification d'images en catégories, désordres (en haut) et saines (en bas) (colonne de gauche) ; détection de fissures (colonne du milieu) ; segmentation d'images (colonne de droite). (Cerema ENDSUM – agence de Strasbourg).

La taille de la base d'apprentissage est un critère important pour obtenir de bonnes performances en classification et les méthodes d'apprentissage profond sont particulièrement gourmandes en nombre d'échantillons. Collecter des données représentatives n'est pas une tâche aisée, d'autant plus lorsque les éléments à classer sont par nature rares et annoter celles-ci prend parfois beaucoup de temps. Dans le cadre de la segmentation, l'annotation doit se faire au pixel près. Des techniques d'augmentation artificielle

de données ou de moindre annotation peuvent être mises en œuvre pour l'apprentissage mais les performances finales sont souvent diminuées. Un compromis doit donc être trouvé entre la taille de la base de l'apprentissage et le coût de collecte et d'annotation des données.

La capacité de généralisation du modèle est un autre facteur à prendre en compte. Cela correspond à la capacité d'obtenir de bonnes prédictions pour les données de même type que l'on présente aux classifieurs. Il faut ainsi éviter d'apprendre des éléments très spécifiques ou très détaillés et arriver à ce qu'on appelle le sur-apprentissage. Les algorithmes d'apprentissage profond (ou architectures) actuels permettent de répondre à un ensemble de problématiques de classification, détection dans des images ou nuages de points sous réserve d'avoir une base d'apprentissage suffisante. Outre ces aspects quantitatifs, des travaux portant sur la combinaison de modalités (images visibles, 3D, infrarouge, radar, cartographies...) dans les architectures neuronales pourraient également permettre d'être une solution à certains besoins pour la gestion du patrimoine.

En conclusion, on note que, depuis quelques années, les algorithmes de reconnaissance de forme ont connu des améliorations fortes, grâce à l'essor des méthodes par apprentissage profond. Celles-ci ont donné lieu à une augmentation très importante des performances, que ce soit en classification, détection ou segmentation. Un des facteurs limitants pour un apprentissage performant est la constitution d'une base de données représentative. Cela peut s'avérer particulièrement difficile lorsque l'objet d'intérêt est par nature rare, variable et situé dans un environnement complexe.

Pour des applications d'aide à l'inspection, les techniques d'apprentissage supervisé seront plus simples à mettre en œuvre pour la détection d'équipements par exemple que pour détecter des pathologies. Dans le premier cas, l'objet est manufacturé, voire normalisé et d'un aspect très différent de son entourage. Dans le second cas, la variabilité intrinsèque de la pathologie et la ressemblance éventuelle avec des zones sans désordres rendent complexe la détection. Des travaux de recherche sont cependant menés pour relever ce défi.

### **III. Apport des outils numériques pour le recensement et l'identification des ouvrages et de leurs équipements**

Si les niveaux d'investissement et d'externalisation pour la gestion du patrimoine en ouvrages d'art varient de façon conséquente en fonction des maîtres d'ouvrage, la gestion d'un patrimoine d'ouvrages comporte des lignes directrices communes à tous. L'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art [7], rédigée pour les ouvrages des routes nationales et qui traite plus particulièrement de la surveillance, de l'évaluation de l'état, de l'entretien et de la réparation des ouvrages d'art fait référence en la matière et peut être utilisée par tous les maîtres d'ouvrage pour bâtir leur référentiel.

En premier lieu, le maître d'ouvrage doit connaître la totalité des ouvrages qui relèvent de sa compétence. Ainsi, un recensement des ouvrages présents sur son réseau d'infrastructures doit être mené permettant *a minima* de connaître pour chaque ouvrage : son type, sa localisation et ses principales dimensions. A ce titre, le maître d'ouvrage doit se fixer des règles : par convention et habituellement, on entend le plus souvent par ouvrage de franchissement les ponts de plus de 2 mètres d'ouverture, et par ouvrage de soutènement les murs de plus de 2 mètres de hauteur visible. Plusieurs autres informations peuvent venir compléter opportunément ces premières données, comme par exemple la période de construction, les hypothèses de calcul, le type d'itinéraire supporté, le trafic associé... Le recensement exhaustif peut être réalisé par les services du maître d'ouvrage ou externalisé à un bureau d'études spécialisé en ouvrages d'art. Ce point de départ ne doit pas être négligé. En effet, les patrimoines ne sont pas toujours connus de façon exhaustive et des problématiques complexes de domanialité peuvent rendre le recensement assez complexe. Il est primordial que les informations issues du recensement et de la vie de l'ouvrage soient rassemblées au sein d'un dossier d'ouvrage interrogeable facilement et qui doit être actualisé jusqu'à la démolition de l'ouvrage. Une définition du contenu d'un dossier d'ouvrage est présentée dans le fascicule 1 de l'ITSEOA [7].

La première étape de la gestion de patrimoine est donc de connaître l'existence des ouvrages, leur positionnement géographique précis en lien avec le réseau routier et la typologie des ouvrages. Il peut également être opportun, dans le cadre d'un recensement d'ouvrages, de répertorier également les équipements d'ouvrages et les équipements routiers attenants aux ouvrages. En effet, la gestion de ces équipements influe directement sur les ouvrages d'art concernés et est souvent partie intégrante de la gestion des ouvrages à proprement parler. Dans cet article nous allons donc détailler les différents points qui permettent de répondre à ce premier besoin.

### III.1 Détection et localisation d'ouvrage

De nombreux ouvrages sont potentiellement difficiles à observer (mur de soutènement aval ou de faible hauteur apparente, petit ouvrage hydraulique sous une grande hauteur de remblai, ouvrages sous végétation dense...). Par ailleurs, pour des raisons diverses, la localisation des ouvrages est parfois trop approximative. Cela peut entraîner des difficultés dans leur gestion, voire des situations d'absence de visite d'évaluation.

L'objectif est donc double : il faut être en mesure de détecter les ouvrages et ensuite il faut être capable de les localiser précisément (précision au mètre), en gardant la capacité de réaliser cette localisation au sein du référentiel routier utilisé.

Classiquement, pour les ouvrages d'art, il existe les configurations suivantes :

- Ouvrage portant une route et permettant le franchissement de route(s) ;
- Ouvrage portant une route et ne permettant pas le franchissement d'une route (franchissement hydraulique, franchissement de brèches...);
- Ouvrage ne portant pas une route et permettant le franchissement de route(s) (passage à faune, pont canal, pont SNCF...);
- Mur protégeant une route ;
- Mur soutenant une route.

Par ailleurs, même s'ils ne sont pas, à proprement parler, des ouvrages d'art, les portiques, potences et hauts-mâts (PPHM), les candélabres, les filets de protection, pièges à cailloux, les écrans de protection phonique, etc doivent également être recensés et peuvent être gérés selon une méthode inspirée de la gestion de patrimoine des ouvrages d'art. Dans la suite de cet article, nous intégrerons les PPHM à notre réflexion. Les autres objets ne seront pas traités plus en détail mais l'approche décrite pourra leur être profitablement adaptée. Pour la suite, nous parlerons d'ouvrages, incluant également les PPHM dans ce terme.

#### Détection

Deux technologies semblent les plus adaptées pour détecter ces objets, l'imagerie et le LIDAR (télédétection par laser). Ces technologies, possiblement couplées, peuvent être véhiculées différemment pour atteindre l'objectif.

#### Les ponts

Une analyse automatique de photographies satellites peut être envisagée pour détecter les différentes brèches franchies par les routes sur un territoire donné. Ces analyses pourraient être croisées avec les données cartographiques de l'IGN, en particulier en ce qui concerne les chemins, les voies ferrées et les cours d'eau croisés par une route. Les positions d'ouvrages probables seraient alors renseignées pour vérification.

Une autre approche imaginable serait de parcourir le réseau avec un véhicule équipé de capteurs lui permettant d'acquérir automatiquement les différences de niveau autour de l'infrastructure parcourue afin d'en déduire automatiquement les positions probables des brèches et donc des ouvrages franchis.

Ensuite, avec ces données, un véhicule équipé de caméras circulera sur l'ensemble du réseau routier défini. Une identification automatique par analyse des images est alors envisageable pour trouver les ouvrages franchissant une route. Aux endroits de la route identifiée comme franchissant une brèche, le déploiement par un opérateur d'un drone équipé de différents capteurs (caméras visibles ou infrarouges, radar...) est envisageable pour détecter des passages inférieurs non visibles depuis le réseau principal ou secondaire. L'ajout de LIDAR est en particulier intéressant pour mieux identifier les ouvrages sous couvert végétal. Cette phase de parcours du réseau est nécessaire pour identifier les ouvrages franchissant une route sans nécessairement porter une infrastructure identifiable via les données IGN (on peut penser par exemple aux passages à faune) et pour vérifier les positions probables d'ouvrages identifiées.

### Les murs

Comme pour les ponts, le croisement de photos satellites et de données IGN permet dans une première approche de localiser des zones avec une présence probable de mur. La principale donnée utilisée serait alors les différences de niveau entre la plate-forme routière et le terrain environnant. Les zones identifiées de cette façon et celles sur lesquelles subsisteraient un doute seraient alors renseignées pour vérification. Cette approche est très loin de permettre un relevé exhaustif.

Dans une autre approche, un véhicule pourrait parcourir le réseau pour acquérir automatiquement ces différences de niveau de part et d'autre de l'infrastructure routière parcourue et ainsi détecter les zones d'intérêt avec présence potentielle de murs. Cette acquisition pourrait être avantageusement complétée par un outil de reconnaissance automatique de parois présentant une géométrie régulière, ce qui permettrait également d'indiquer les objets pouvant être des murs de soutènement. Comme la première approche, cette méthode ne permettra probablement pas un relevé exhaustif.

Pour les deux approches, la confirmation de présence de murs serait alors envisageable avec le même mode opératoire que pour les ponts, à savoir un véhicule équipé de caméras circulant sur le réseau routier. L'utilisation d'un drone équipé de caméras et de LIDAR semble également nécessaire en complément pour les murs non visibles depuis le réseau et/ou sous couvert végétal trop prononcé.

### Les PPHM

Pour les PPHM, une voiture équipée de caméras parcourant le réseau routier semble suffisante pour répondre au besoin. En effet, une analyse des données cartographiques ne sera d'aucune utilité pour ce type d'objet. Cela nécessite toutefois de développer les outils de traitement d'image permettant de reconnaître automatiquement les différents PPHM et de les distinguer d'autres structures type candélabre. Ce besoin est explicité au §III.4.

### Localisation

Une fois l'ouvrage détecté, plusieurs méthodes sont possibles pour le localiser de façon absolue, comme vu en §II.1.

Il est possible de se positionner également directement dans un référentiel propre au gestionnaire, en abscisse curviligne par exemple, calculée avec l'avancement du véhicule de relevé. Cependant, pour obtenir une précision inférieure au mètre, il est nécessaire de recalibrer régulièrement l'abscisse sur des points de repère dont la localisation est connue de manière précise.

### Evaluation de l'apport

L'actualité des dernières années a mis en lumière l'importance qu'il faut accorder au suivi des ouvrages d'art. Or, comme le soulignait la commission d'enquête du Sénat, un des points bloquants de la gestion des ouvrages d'art français est leur recensement. Ce manque en matière de recensement a plusieurs causes dont, notamment, la difficulté d'accès à certaines zones aux abords du réseau routier et la baisse de moyens humains pour effectuer les visites d'ouvrages.

Les outils numériques, à travers l'utilisation qui est décrite ci-dessus, permettent d'envisager des relevés automatisés et sans moyens d'accès particuliers. L'apport répond donc aux besoins déterminés.

### Faisabilité du projet envisagé (Tableau 1)

Le tableau (tableau 1) ci-dessous et les autres tableaux qui suivent dans cet article décrivent la faisabilité des apports envisagés.

	<b>Tâches accessibles rapidement en assemblant des techniques existantes</b>	<b>Tâches faisables, mais nécessitant des développements particuliers</b>	<b>Tâches qui nécessitent la levée de verrous technologiques ou scientifiques</b>
Détection des ponts		Détecter automatiquement les ouvrages sur les données recueillies.	Détecter les positions probables d'ouvrages via une analyse croisée image satellite et données IGN ou une analyse automatique de différence de niveaux.
Détection des murs		Détecter automatiquement les ouvrages sur les données recueillies.	Détecter les positions probables d'ouvrages via une analyse croisée image satellite et données IGN ou une analyse automatique de différence de niveaux.
Détection des PPHM	Détecter automatiquement les ouvrages sur les données recueillies.		

**Tableau n°1 : Faisabilité de la détection et de la localisation**

### Limite des apports

La première limite est liée à la perceptibilité des ouvrages en eux-mêmes. En milieu ouvert, la plupart des éléments à franchir pour les routes, telles que les brèches, cours d'eau, dénivelés importants, voies ferrées, sont visibles sur des photos aériennes. La présence d'ouvrages associés à ces éléments à franchir est donc potentiellement détectable. En revanche, certains ouvrages peuvent être non visibles depuis le réseau routier tout en ne correspondant pas à des obstacles identifiables. Ainsi, on peut citer certains ouvrages de décharge ou certains ouvrages de continuité hydraulique au niveau de bretelles. L'utilisation de photos aériennes pour les détecter n'est donc pas possible. De la même façon, les intersections les plus ténues, soit sous fort couvert végétal, soit en milieu urbain ou utilisées par des chemins mal répertoriés sont souvent peu visibles. Leur détection en sera d'autant plus difficile uniquement à partir de photos. Or, ce sont ces types d'ouvrages qui semblent devoir le plus bénéficier d'une approche plus systématique à l'aide du numérique car ce sont les moins suivis. Une expérience sur une zone connue et limitée pourra permettre de lever en partie ces interrogations. Dans le cas d'ouvrages sous couvert végétal dense, l'utilisation de LIDAR aéroporté peut être envisagée. Toutefois, cette technologie nécessite d'être testée de façon précise afin d'estimer son niveau de fiabilité.

La deuxième limite est d'ordre réglementaire. Le survol par drone des voies circulées, des zones habitées et des terrains privés est soumis à une réglementation stricte. Obtenir des autorisations pour des survols « systématiques » de drones sur certaines zones n'est pas garanti.

La troisième limite est liée au traitement des données obtenues, en particulier l'automatisation de la détection des ouvrages. En effet, la reconnaissance automatique d'objets tels que des ponts ou des murs est encore une problématique de recherche. Les approches de type apprentissage automatique

apparaissent intéressantes pour détecter ces objets mais leur variabilité et la complexité des situations rendent le défi difficile. De la même façon, la reconnaissance automatique de configuration de mur de soutènement sous couvert végétal comme évoqué plus haut est à créer. Au-delà de cet aspect recherche, la mise en place de logiciels dédiés à l'acquisition et au traitement (interface opérationnelle) est également une tâche à considérer. Ces phases de recherche en traitement de données et développement informatique sont donc complexes et coûteuses.

Enfin, la dernière limite identifiée est liée au stockage des données. Les images et les nuages de points recueillis sur l'ensemble du réseau routier représentent en effet un volume de données très conséquent (de l'ordre de 20 Go/km traité juste pour la partie nuage de points). La gestion de ce type de volume de données demande des capacités informatiques spécifiques.

### **III.2 Relevé et suivi géométriques de l'ouvrage**

Le relevé géométrique d'un ouvrage vient compléter le recensement en caractérisant l'ouvrage. Le relevé va permettre de connaître le nombre de travées de l'ouvrage, la largeur entre garde-corps, la longueur d'un mur de soutènement ou sa hauteur visible... Ces données permettent d'identifier correctement un ouvrage (point développé au §III.3) et sont nécessaires à la constitution du dossier d'ouvrage.

L'objectif d'un suivi géométrique régulier est de détecter l'apparition de désordres ou d'évolutions non souhaitées. En fonction de la précision du suivi géométrique, il devient dès lors possible de détecter des surcharges d'enrobés, des tassements d'appui, des bombements de murs, des chocs sur parapet, sur équipements, etc. Ce suivi géométrique est à distinguer d'un suivi géométrique mis en place dans le cadre d'une surveillance renforcée ou d'une haute surveillance. En effet, le suivi géométrique issu d'un dispositif de surveillance est spécifique à chaque ouvrage et doit détecter précisément des variations qui peuvent être faibles. L'approche développée ici vient plutôt en complément des visites d'ouvrages et du patrouillage, afin d'affiner la connaissance des ouvrages et de détecter l'apparition de désordres importants.

Le mode opératoire décrit au §III.1 permet également de réaliser le relevé géométrique dans la majorité des cas puisque l'utilisation couplée d'un véhicule et d'un drone rend possible ce relevé même pour les parties peu visibles depuis le réseau routier. Ainsi, ce relevé géométrique sera réalisé par l'utilisation du LIDAR, de l'imagerie et, assez souvent, par la combinaison des deux. Les modèles 3D, soit laser, obtenus à partir de données LIDAR, ou photogrammétriques à partir d'images peuvent atteindre des précisions de l'ordre du centimètre, ce qui est suffisant pour ce type de relevé géométrique.

Le suivi géométrique des ouvrages peut être réalisé sous différentes formes, en fonction de la volonté du maître d'ouvrage. Il peut être réalisé annuellement et par itinéraires, afin d'évaluer les variations géométriques d'une année sur l'autre. Ce suivi géométrique est à rapprocher de celui réalisé lors des visites de surveillance des ouvrages. Alors, ce suivi devra être capable de détecter des déversements ou des bombements de murs, des tassements d'appui, etc. Le suivi géométrique peut également être réalisé plus régulièrement, avec un objectif de sécurisation des ouvrages et des équipements. Ce suivi géométrique est à rapprocher des opérations de patrouillage, existantes sur les réseaux nationaux et autoroutiers par exemple. Alors, le suivi géométrique peut permettre de suivre également des dégradations liées aux conditions extérieures et présentant un risque pour l'utilisateur. On peut citer pour exemples un choc sur une poutre entraînant un éclat important du béton, des éléments de corniches désalignés, une déformée anormale d'un PPHM, des chocs sur parapet, glissières ou garde-corps.

Dans les deux approches du suivi géométrique, il existe déjà des logiciels commerciaux ou en libre accès qui permettent d'effectuer des mesures de distance, surface, volume sur les modèles 3D. Avec ces logiciels, il est également possible de comparer deux modèles 3D entre eux, afin de suivre l'évolution d'un ouvrage. Dans le cas d'une comparaison, il est cependant nécessaire au préalable de recalibrer les modèles entre eux. De plus, en fonction de l'objet considéré, des seuils de différences géométriques peuvent être définis. Ainsi, lorsque cette valeur limite est atteinte, l'outil alerte automatiquement le gestionnaire afin que

celui-ci regarde les images ou les représentations de l'objet afin de déterminer les suites à donner. Ces possibilités demandent que l'objet soit correctement identifié, c'est-à-dire comme un garde-corps ou une glissière, une corniche ou une poutre. Le suivi des équipements est plus détaillé dans le §III.4.

### Evaluation de l'apport

Le relevé géométrique complète le recensement et le dossier d'ouvrage. Il n'y a pas de surcoût important par rapport à la démarche développée au §III.1 et les informations recueillies sont très intéressantes pour la suite de la vie de l'ouvrage.

Le suivi géométrique est une notion qui est incluse dans les méthodes de surveillance. Par exemple, les désalignements de garde-corps sont des signes pouvant traduire des comportements structuraux à risques. Ces suivis peuvent être réalisés dans le cadre des visites annuelles mais seules les évolutions évidentes sont alors relevées. Ainsi, pour des ouvrages suivis selon l'ITSEOA, ce suivi géométrique n'est réalisé qu'une fois tous les trois ans par un agent formé au fonctionnement des ouvrages d'art. De plus, les mesures nécessaires sont souvent difficiles à réaliser car elles demandent un matériel non-courant (de géomètre par exemple) ou car elles sont à réaliser à des endroits peu accessibles. Enfin, seules les variations détectables à l'œil nu sont usuellement relevées. L'apport de l'outil proposé est dès lors très important puisqu'il permet de gagner en précision, en régularité et en exhaustivité du relevé par rapport au suivi actuel tout en réduisant le temps à passer sur les ouvrages pour réaliser ces mesures, permettant ainsi un gain pour la sécurité des agents et l'exploitation du réseau. Un suivi géométrique régulier, type patrouillage, entraîne également un gain de sécurité important pour les usagers.

### Faisabilité du projet envisagé (tableau 2)

	<b>Tâches accessibles rapidement en assemblant des techniques existantes</b>	<b>Tâches faisables, mais nécessitant des développements particuliers</b>	<b>Tâches qui nécessitent la levée de verrous technologiques ou scientifiques</b>
Relevé géométrique	Réaliser des relevés géométriques à grand rendement des objets désirés avec une précision de l'ordre du 1 cm.	Réaliser des relevés géométriques à grand rendement des objets désirés avec une précision subcentimétrique.	
Suivi géométrique	Réaliser des comparaisons de relevés sur des objets globaux (profil en long, mur, glissière...) avec une précision de l'ordre du cm.	Mise en place de seuils déclenchant des alertes automatiques.	Décomposition automatique des objets pour réaliser des comparaisons de relevés sur ces objets (parapets, corniches, poutre...) avec une précision de 1 cm.

Tableau n°2 : Faisabilité des relevé et suivi géométriques

### Limite des apports

Comme pour la détection et la localisation (§III.1), l'utilisation de drones au-dessus de voies circulées ou de terrains privés et les volumes très importants de données générées sont des obstacles à prendre en compte. D'autre part, certains ouvrages ou parties d'ouvrages peuvent s'avérer difficilement accessibles, y compris par drone. Des acquisitions statiques peuvent être associées pour compléter le relevé géométrique de ces zones.

Le suivi géométrique est composé en particulier d'une comparaison avec un état de référence. Afin de réaliser cette comparaison et de déduire automatiquement d'éventuelles alertes, il faut être en mesure d'identifier correctement l'objet et il faut pouvoir comparer deux mesures sans avoir une cible servant de

point fixe. Cela pouvant s'appliquer à une variété assez importante d'objets, les développements informatiques sont conséquents.

Enfin, toute mesure implique des notions de métrologie et de norme qui sont à développer pour des outils comme ceux imaginés.

### III.3 Identification des ouvrages

Une fois l'objet observé et reconnu comme étant un pont, un mur ou un PPHM et sa géométrie connue, il devient nécessaire de qualifier sa typologie, c'est-à-dire de déterminer la famille d'ouvrage ou de PPHM à laquelle il appartient. Afin de cadrer la réflexion, seules les typologies définies au sein de la méthode IQOA seront considérées. Dans le cas des PPHM, on se limitera à la distinction entre les trois grands types, portiques, potences et hauts-mâts.

La typologie IQOA est très détaillée, ce qui répond aux spécificités de chaque type d'ouvrage en matière de fonctionnement mécanique, de matériau constitutif et de durabilité. Cependant, plusieurs de ces catégories ne sont pas toujours distinguables visuellement. Il n'est donc pas envisageable, dans le cadre d'un recensement, de qualifier la typologie au-delà de ce qui est possible avec des données visuelles (images ou nuages de points) sans avoir le dossier d'ouvrage. Aussi, dans la perspective d'un recensement en partie automatisé, la construction de familles d'ouvrages est nécessaire et ces familles ne devront pas être construites sur les similitudes de matériau ou de structure comme c'est usuellement le cas mais sur la géométrie et l'apparence visuelle des ouvrages.

L'objet de cet article n'est pas de construire ces familles, qui, le cas échéant, devront être élaborées par un comité d'experts. Toutefois, afin d'illustrer le propos tout en restant volontairement simple, on peut envisager la famille de murs suivante : Murs à parement maçonné. Cette famille inclut donc les types de murs 1 et 2 ainsi que les murs dont seul le parement est maçonné et qui auraient été classés autrement selon la méthode IQOA (paroi cloutée, mur encastré sur semelle...).

L'identification des ouvrages comporte deux niveaux. Le premier niveau, qui doit être automatique lors de la détection (§III.1) afin de donner un intérêt à la démarche, est l'identification de l'objet détecté comme étant un pont, un mur ou un PPHM. Le deuxième niveau d'identification est un niveau plus fin où l'objet, une fois identifié comme un PPHM, par exemple, sera classé comme un portique.

L'analyse automatique des nuages de points et/ou des images afin d'obtenir le premier niveau d'identification peut être envisagée via des outils utilisant l'apprentissage automatique. Les méthodes d'apprentissage profond (deep learning) sont extrêmement performantes dans de nombreux domaines mais nécessitent une grande quantité de données d'apprentissage. D'autres techniques de classification, moins gourmandes en données, peuvent également être testées.

L'identification de second niveau peut, soit être automatisée via des outils similaires mais qui seraient très coûteux à développer, soit être réalisée manuellement. Dans le cas d'un classement manuel lors du premier parcours du réseau, le développement d'un outil s'assurant automatiquement de la correspondance entre l'objet et son identification lors des passages suivants serait alors moins coûteux.

#### Evaluation de l'apport

Ce point vient en complément et est indissociable du point développé au §III.1. Aussi, son apport est de premier ordre.

### Faisabilité du projet envisagé (tableau 3)

	<b>Tâches accessibles rapidement en rassemblant des techniques existantes</b>	<b>Tâches faisables, mais nécessitant des développements particuliers</b>	<b>Tâches qui nécessitent la levée de verrous technologiques ou scientifiques</b>
Identification de la famille d'ouvrage	Premier niveau d'identification pour les PPHM.	Premier niveau d'identification pour les murs et les ponts. Second niveau d'identification pour les familles d'ouvrages les plus homogènes.	Second niveau d'identification pour l'ensemble des familles.

Tableau n°3 : Faisabilité de l'identification

### Limite des apports

Comme dans les paragraphes précédents, les grands volumes de données générées demanderont des moyens informatiques spécifiques pour être stockés et traités.

De plus, les travaux en classification automatique d'objets par intelligence artificielle sont encore du domaine de la recherche et nécessitent un grand nombre de données pour l'apprentissage. Si l'état des connaissances actuelles semble indiquer que le premier niveau d'identification est réalisable avec de bonnes performances, il sera toutefois nécessaire de le démontrer expérimentalement.

## III.4 Equipements

Une thématique très prenante pour les gestionnaires d'ouvrages et de voiries est la gestion des équipements, en section courante et, qui nous intéresse plus particulièrement ici, sur et à proximité d'ouvrages [8]. La gestion des équipements est délicate car ce sont des éléments qui ont des durées de vie inférieures à celles des structures qu'ils accompagnent et qui ont des rôles essentiels liés à la sécurité des usagers et à la durabilité des ouvrages. Leur remplacement est souvent problématique car il a un impact important sur l'exploitation du réseau. Il est donc très important pour le gestionnaire d'avoir une connaissance fine de l'état des équipements afin de réaliser une maintenance adaptée aux conditions d'exploitation (campagne de réfection de joints de chaussée par itinéraires, remplacement de glissières sur des linéaires importants, etc...).

Comme les équipements sont très susceptibles d'avoir des évolutions d'état dues à des actions de l'environnement (vents forts, chocs de véhicule, pluies fortes...), un suivi régulier avec plusieurs passages par an semble le plus adapté.

L'outil proposé doit être en mesure de reconnaître les différents types d'équipements, de les localiser précisément et de comparer leur état par rapport à un état de référence. Les différents équipements qu'il pourrait être intéressant de suivre avec un outil de ce type sont, de façon non exhaustive :

- Glissières, barrières de retenue et garde-corps ;
- Joints de chaussée, joints de trottoir ;
- Fils d'eau, bordures et corps de trottoir ;
- Présence de végétation sur et à proximité de l'ouvrage ;
- Ecrans anti-déversement et anti-bruit ;
- Etat des réseaux portés...

Afin de rendre possible un relevé rapide et régulier des équipements d'un réseau, il faut que le recueil des données soit réalisé uniquement depuis le réseau routier et sans prévoir d'arrêt. En l'état des technologies, il semble envisageable de réaliser ce recueil uniquement via un relevé photographique ou vidéo. L'écueil

le plus important associé au développement d'un outil permettant de traiter un grand nombre d'équipements est qu'il puisse reconnaître les équipements différents avec les nombreuses variantes existantes. La seule possibilité pour réussir le traitement des données recueillies semble reposer sur un outil d'apprentissage automatique. Ainsi, on aura un outil constitué probablement d'une caméra fixée sur un véhicule léger qui visionnera le réseau parcouru. Il détectera automatiquement les équipements qui auront été ciblés. Une fois cette détection réalisée, les équipements seront qualifiés et leur état relevé. Par exemple, dans le cas d'un joint de chaussée, l'outil pourra déterminer le type du joint de chaussée, sa longueur, son souffle au moment du passage, les éventuels ressauts, les matériaux l'encombrant, les parties du joint détériorées et les fissures et les décollements des solins. Ce relevé de désordre sera ensuite comparé par l'outil au relevé de désordre précédent et des indicateurs permettront de faire remonter les informations et les éventuelles alertes sur l'ensemble de l'itinéraire choisi.

### Evaluation de l'apport

En prenant l'hypothèse d'un suivi mensuel des équipements d'un réseau, les besoins humains pour assurer la réalisation des relevés et leur exploitation sont considérables. Pour la majorité des gestionnaires, il n'est pas envisageable de consacrer de tels moyens au suivi des équipements. Seuls les événements les plus impactant en termes de sécurité sont facilement détectables. Un suivi régulier permettrait d'optimiser la gestion de ces derniers et un recensement précis et actualisé garantirait le respect des règles de l'art et des normes en matière de sécurité. L'outil envisagé rendrait possible ce suivi sans avoir à investir autant de moyens. De plus, les relevés se feraient sans perturber la circulation et sans imposer de balisage, ce qui est bénéfique tant au point de vue de la sécurité que des besoins d'exploitation. Le patrouillage actuellement réalisé ne peut pas définir la conformité des équipements suivis, il ne peut que faire remonter les accidents ayant impacté lourdement les équipements. Un suivi du type envisagé permet à la fois de suivre l'état des équipements et leur conformité par rapport aux règles de l'art.

Enfin, l'outil permettrait de constituer une base de données de l'ensemble des équipements d'un réseau, rendant ainsi possible de travailler des données en masse et d'évaluer statistiquement des tendances qui ne sont pas fiabilisées pour le moment, comme par exemple les durées de vie de certains types d'équipements.

Actuellement, les dossiers d'ouvrage sont souvent mal renseignés en ce qui concerne les équipements. En effet, le patrouillage et la gestion d'une partie des équipements ne relèvent pas toujours de la compétence des gestionnaires d'ouvrage classique et les remontées d'information ne sont pas toujours bien faites. Ainsi, l'entretien ou le renouvellement des équipements d'un ouvrage n'est pas toujours documenté. Une démarche de recensement régulier permettrait de compléter et d'actualiser les dossiers d'ouvrage sur cette thématique.

### Faisabilité du projet envisagé (tableau 4)

	<b>Tâches accessibles rapidement en assemblant des techniques existantes</b>	<b>Tâches faisables, mais nécessitant des développements particuliers</b>	<b>Tâches qui nécessitent la levée de verrous technologiques ou scientifiques</b>
Détection et recensement des équipements	Détection de lacunes	Détection et recensement d'équipements par famille (garde-corps, joints de chaussée).	Détection et recensement d'équipements par modèle.
Relevés de désordres sur équipements	Détection de lacunes	Détection de désordres géométriques par comparaison entre relevés.	Relevés et identification automatique de désordres.

Tableau n°4 : Faisabilité de l'outil pour les équipements

### Limite des apports

Il existe un nombre très important de type d'équipements différents et de nombreuses variantes par équipement. Certaines de ces variantes restent peu courantes en France. Identifier un équipement demandera donc de définir précisément quelles sont les grandeurs physiques spécifiques à chaque variante d'équipement. Ces critères de définition devront de plus être tenus à jour au gré des nouveaux équipements obtenant le marquage CE. Il convient de rappeler que même pour le spécialiste, qualifier le niveau de retenue d'un dispositif est difficile sur la seule base de données visuelles. Cela rend d'autant plus ambitieuse la conception d'un outil de reconnaissance automatique comme décrit ci-dessus. Son développement sera complexe.

L'autre difficulté facilement identifiable est le relevé automatique à grand rendement de certains désordres (comme les fissures des solins des joints de chaussées ou la corrosion d'équipements métalliques) qui peut être complexe en l'état actuel des technologies.

Enfin, comme dans les paragraphes précédents, les grands volumes de données générées demanderont des moyens informatiques spécifiques pour être stockés et traités.

## **III.5 Outils développables à court terme**

Le champ des possibles ouvert par les outils numériques est très vaste pour le recensement des ouvrages d'art. Toutefois, comme le montrent les tableaux de faisabilité présentés auparavant, l'état de la recherche ne permet pas de développer à court terme l'ensemble des automatismes envisagés. Un outil dérivé de cette démarche prospective et développable plus rapidement est présenté dans la suite de ce paragraphe.

Le patrimoine en ouvrages d'art de certains gestionnaires reste largement méconnu. Dans le cadre de campagnes d'inventaire, des équipes de spécialistes en ouvrage d'art ont pour mission de réaliser le recensement des ouvrages d'art. En équipant ces équipes de drones et/ou de LIDAR, le recensement permettra également d'avoir les modèles 3D des ouvrages visités. Ensuite, l'idéal sera de disposer d'algorithmes automatiques pour extraire les données et renseigner le modèle 3D obtenu. Ces algorithmes restent encore du domaine de la recherche et du développement et ne sont donc pas opérationnels à court terme. De plus, ces outils automatiques apprennent à détecter ou classer des objets à partir d'un ensemble d'exemples déjà annotés, il est donc nécessaire de construire cette base.

Cependant, à court terme, il est envisageable de développer un outil logiciel utilisant les données numériques collectées et permettant de répondre à un double défi.

D'une part, un objectif opérationnel en proposant une interface opérationnelle entre le modèle 3D et l'utilisateur pour répondre aux besoins « métier » de recensement. Ce dernier bénéficiera de

fonctionnalités d'aide à la saisie sur le modèle comme par exemple de l'aide au pointage d'éléments ou détournement de zones, des rubriques sémantiques, des outils de mesure, un lien avec une cartographie... De cette façon, le spécialiste pourra aisément définir sur le modèle les équipements et les différentes parties d'ouvrages. Le relevé géométrique de l'ouvrage sera fait de façon automatique et les grandeurs caractéristiques seront automatiquement reportées dans une base de données. Cet outil permettra de construire une base de données unifiée et de réaliser les modèles 3D des ouvrages visités, complétant ainsi le dossier d'ouvrage (ou l'initiant le cas échéant).

D'autre part, un objectif recherche en utilisant en parallèle les données renseignées par l'expert grâce à cette interface pour construire les bases de données annotées permettant ainsi d'envisager la phase d'apprentissage des algorithmes d'intelligence artificielle. Suite à cet apprentissage, les outils automatiques pourront petit à petit être intégrés à cet outil logiciel.

## **IV. Conclusion et perspectives**

Le secteur privé propose de nombreuses prestations entrant dans le champ de la gestion du patrimoine et mobilisant les technologies numériques. Ces prestations sont très variées, allant de la représentation 3D d'ouvrage à l'instrumentation avec transmission en direct en passant par l'analyse automatique de défauts. Les retours d'expérience du réseau scientifique et technique du Ministère incitent à une certaine prudence quant aux résultats présentés pour certaines prestations, en particulier sur les questions de détection automatique et de quantification des désordres. Toutefois, le foisonnement de développements et l'évolution rapide des technologies laissent présager une utilisation sans cesse accrue de ces technologies dans un futur proche.

Les plus-values envisagées de ces nouvelles approches sont nombreuses et importantes. Pour le recensement et le suivi courant des ouvrages, ces nouveaux outils permettraient de gagner en exhaustivité et en régularité de suivi en nécessitant un investissement raisonnable en moyens humains. Il est imaginable d'accéder à moyen terme à des outils à grand rendement, dont les atouts en matière d'économie, d'exploitation et de sécurité sont nets. Il reste cependant différents objets qui demandent des niveaux de détection et de précision qui ne sont pas possibles avec des moyens dynamiques et qui nécessiteront des acquisitions statiques.

L'utilisation de ces technologies s'accompagne cependant de différents défis. Tout d'abord, nombre des évolutions fortes pressenties reposent sur l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage et, plus généralement, sur l'introduction de techniques liées à l'intelligence artificielle. Ces techniques ont besoin de volumes considérables de données afin de pouvoir devenir opérationnelles. C'est pourquoi un des défis de l'utilisation de l'intelligence artificielle réside en la constitution de bases de données annotées par des spécialistes en ouvrages d'art. Cependant, dans le domaine des ouvrages d'art, les phénomènes à apprendre sont parfois rares et difficiles à distinguer. Apprendre un modèle à partir d'objets faiblement représentés reste un verrou de recherche encore à lever. L'apport des spécialistes sera également primordial lors de la validation des résultats des algorithmes, afin de fiabiliser les résultats obtenus. Ce besoin fort d'interaction à différents stades du développement entre les spécialistes de l'intelligence artificielle et les spécialistes du métier ouvrage d'art est un autre défi fort. Le manque de qualification métrologique des outils ou prestations proposées est un constat souvent posé et représente une difficulté renouvelée pour chaque nouvel outil. Il est alors important pour le Ministère et pour la profession de pouvoir se reposer sur l'avis éclairé d'experts et à terme sur les évaluations/certifications des outils qui en découlent.

Le travail de réflexion présenté dans cet article permet d'envisager à court terme la construction d'outils utilisant de façon opportune les technologies numériques. Un point commun à l'ensemble des outils imaginables est qu'ils sont tous, par nature, voués à s'améliorer rapidement dans le temps. En effet, leur utilisation de façon opérationnelle permettra également de recueillir de la donnée annotée par des spécialistes et donc participera à un apprentissage automatique plus poussé. Ainsi, un investissement

mesuré pour développer un outil à court terme permettra de développer des outils plus complexes sans avoir à créer de toute pièce les bases de données nécessaires à l'apprentissage. En effet, sans cette approche intermédiaire, la constitution de telles bases est une démarche très lourde et onéreuse.

Une suite à cet article abordera les sujets de l'inspection et du diagnostic des ouvrages.

## V. Références bibliographiques

- [1] Sénat, Commission de l'aménagement du territoire et du développement durable, Sécurité des ponts : éviter un drame, Rapport d'information de MM Patrick CHAIZE et Michel DAGBERT, n° 609, 26 juin 2019, (<https://www.senat.fr/rap/r18-609/r18-609.html>).
- [2] Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (Sétra), IQOA-Murs-Murs de soutènement-méthodologie, guide méthodologique, ISBN 2-11-094633-4, 52 pages, mars 2005
- [3] Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (Sétra), IQOA - Classification des ouvrages, guide technique, 22 pages, ISBN 2-11-085782-X, mai 1996.
- [4] Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), VSC Méthode d'aide à la gestion de patrimoines - Guide technique - Collection Techniques et Méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, 124 pages, Août 2006.
- [5] Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (Sétra), Gestion des ouvrages d'art, A l'usage des départements et autres collectivités locales, guide méthodologique, mai 2006.
- [6] Institut Des Routes, des Rues, des Infrastructures pour la Mobilité (IDRRIM), Rapport annuel de l'Observatoire National des Routes (ONR) [https://www.idrrim.com/ONR/Les\\_rapports\\_ONR/](https://www.idrrim.com/ONR/Les_rapports_ONR/).
- [7] Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL), Circulaire du 16 février 2011 relative à la publication de la nouvelle instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art. 25/04/2011.
- [8] Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (Sétra), Surveillance et entretien des dispositifs de retenue routiers, guide technique, ISBN 2-11-095826X/ 9782110958266, 45 pages, mars 2010.

# Tabliers multipoutres mixtes

## *Eléments de prédimensionnement*

**LAVAL Hugo<sup>1</sup>, RENAUDIN Fabien<sup>2</sup>, NEIERS Sébastien<sup>3</sup>, CHAMPENOY Damien<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Cerema EST, Groupe OA, 11 rue Jean Mentelin Strasbourg, [hugo.laval@cerema.fr](mailto:hugo.laval@cerema.fr)

<sup>2</sup> Cerema CENTRE-EST EROA Bron, [fabien.renaudin@cerema.fr](mailto:fabien.renaudin@cerema.fr)

<sup>3</sup> Cerema EST TMI EOA, Bât C Ile du Saulcy Metz, [sebastien.neiers@cerema.fr](mailto:sebastien.neiers@cerema.fr)

<sup>4</sup> Cerema EST TMI EOA, Bât C Ile du Saulcy Metz, [damien.champenois@cerema.fr](mailto:damien.champenois@cerema.fr)

---

## Résumé

Dans le cadre de la modernisation du réseau routier, le concepteur est souvent confronté à la nécessité de devoir démolir ou reconstruire des ouvrages dans un contexte fortement contraint. Il faut généralement reconstruire dans des délais courts, en s'interrogeant sur la possibilité de conserver les appuis existants et en intégrant des enjeux environnementaux comme la transparence vis-à-vis des crues.

Le tablier multipoutres mixtes permet d'offrir des solutions intéressantes pour répondre aux enjeux et aux contraintes de sites :

**Gabarit sous ouvrage limité.** En faisant transiter les efforts au travers de plusieurs poutres la solution multipoutres permet d'obtenir des hauteurs de poutre plus faibles comparées à la solution classique du bipoutres mixte.

**Large gamme de largeur de tablier.** L'adaptation du nombre de poutres permet de concevoir une large gamme de largeur de tablier.

**Mise en œuvre rapide.** Le recours à des poutres plus nombreuses mais plus légères permet l'intervention de moyens de levage courants et une préfabrication facilitée du hourdis.

**Réutilisation des appuis existants.** Le tablier multipoutres mixtes permet le plus souvent la conservation des appuis existants tout en assurant une répartition analogue des descentes de charges dans le cadre du remplacement des ponts à poutres en béton.

Le tablier multipoutres mixtes sous chaussée est ainsi particulièrement pertinent de par sa légèreté, sa finesse, sa gamme étendue de portées et son aptitude à la préfabrication. Pour autant, il n'existe pas aujourd'hui de tables de prédimensionnement de ces tabliers ni de guide de conception générale. L'intérêt de cet article est donc de fournir aux concepteurs des éléments de prédimensionnement pour ce type d'ouvrage. Ces éléments de prédimensionnement sont également valables pour la construction d'ouvrages neufs. Cet article s'inspire de la méthodologie générale de prédimensionnement employée pour les tabliers bipoutres mixtes.

# I. Introduction

## I.1. Hypothèses générales

Les prédimensionnements sont proposés pour 3 schémas statiques différents : 1 travée isostatique, 2 travées continues d'égales portées et 3 travées continues en respectant un balancement pour les travées de rive de 0,85. Le calcul des sollicitations est conduit en retenant une inertie constante des poutres. Le domaine de portée principal  $L$  étudié est compris entre 15 et 80 m.

Concernant le profil en travers retenu, il s'agit d'un profil en travers type « autoroutier ». La largeur de tablier est supposée varier de 10 à 21 m.

Le nombre de poutres du tablier est compris entre 2 et 8. L'étude considère un tablier constitué soit de poutres reconstituées soudées (P.R.S) en acier de nuance S355, soit de profilés laminés du commerce. Les profilés employés sont issus de gammes de profilés normalisés, gamme de poutrelles européennes à larges ailes « HE », gamme de poutrelles européennes à très larges ailes « HL », gamme de profilés britanniques « UB ». Le cas des tabliers composés de poutres caissons constituées de deux profilés laminés soudés est également étudié.

Le prédimensionnement a été réalisé en considérant le modèle de charges de trafic LM1. Les tandems sont supposés excentrés (centrés dans leurs voies). La méthode de répartition transversale des charges qui a été utilisée est la méthode de Courbon pour le cas d'un tablier constitué de poutres P.R.S entretoisées ou à pièces de pont. Dans ce cas, les pièces de pont sont généralement des P.R.S pour offrir une largeur de semelle suffisamment large pour assurer le recouvrement des armatures du hourdis. Pour l'étude d'un tablier constitué de profilés laminés non entretoisés, c'est la méthode de Guyon-Massonnet qui a été employée. Pour le cas des poutres caissons, la rigidité de torsion est prise en compte dans le calcul de Guyon-Massonnet. Le coefficient de répartition transversal maximal est toujours obtenu pour la poutre de rive, qui est donc la poutre sur laquelle le prédimensionnement a été réalisé.

Les effets du retrait et du gradient thermique ont également été considérés.

Le calcul du tonnage de charpente métallique est effectué pour les poutres P.R.S uniquement. La répartition de matière a été définie en suivant la répartition des efforts. Un entretoisement est considéré tous les 8m. Le type d'entretoise dépend de la hauteur de poutre adoptée. Les entretoises prises en compte sont donc des poutres IPE 270 à 750. Les masses des connecteurs et des raidisseurs sont négligées.

Cas d'une travée isostatique de portée  $L$  :

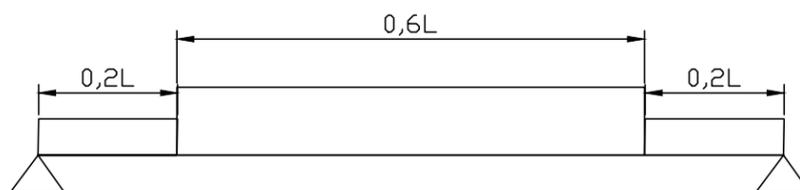


Figure 1 : Répartition longitudinale de matière pour le calcul du tonnage de charpente métallique pour le cas d'une travée isostatique de portée  $L$

Pour le cas d'une travée isostatique de portée  $L$ , deux sections ont été définies. Sur appui, l'épaisseur de semelle inférieure retenue est égale à  $2/3$  de l'épaisseur de semelle employée en travée centrale

(épaisseur déterminée par le prédimensionnement). L'épaisseur de semelle supérieure est égale à  $\frac{2}{3}$  de l'épaisseur de semelle supérieure en travée centrale. L'épaisseur d'âme est égale à 20mm.

Pour la section intermédiaire comprise entre  $(0,2L-0,8L)$ , l'épaisseur de semelle inférieure est celle déterminée par le prédimensionnement. L'épaisseur de semelle supérieure est prise forfaitairement égale à 50mm. L'épaisseur d'âme est égale à 20mm.

Cas de 2 travées continues d'égales portées L :



Figure 2 : Répartition longitudinale de matière pour le calcul du tonnage de charpente métallique pour le cas de 2 travées continues d'égales portées L

La répartition de matière est symétrique. Pour la section sur pile  $(0,8L \text{ à } 1,2L)$ , les épaisseurs de semelle inférieure et supérieure sont celles données par le prédimensionnement avec 18mm d'épaisseur d'âme.

Pour la section  $(0,6L-0,8L)$ , les épaisseurs de semelle inférieure et supérieure sont égales à  $\frac{2}{3}$  des épaisseurs calculées sur pile avec 18mm d'épaisseur d'âme.

Pour la section  $(0-0,6L)$ , les épaisseurs de semelle inférieure et supérieure sont égales à  $\frac{1}{3}$  des épaisseurs de semelles déterminées dans la section  $(0,6L-0,8L)$ . avec 18mm d'épaisseur d'âme.

Cas de 3 travées continues respectant un balancement entre la longueur des travées de rives et la longueur de la travée centrale 0,85 :

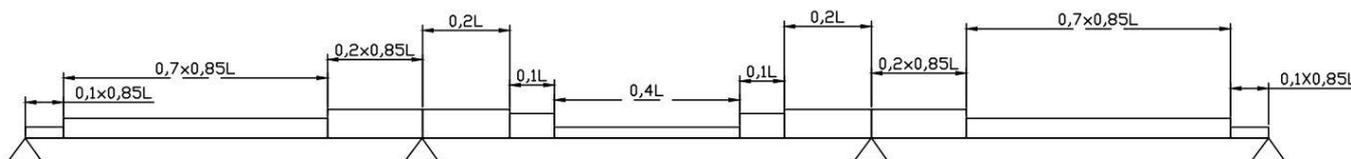


Figure 3 : Répartition longitudinale de matière pour le calcul du tonnage de charpente métallique pour le cas de 3 travées continues en respectant un balancement pour les travées de rive de 0,85

La répartition de matière est symétrique. Pour la travée centrale, il y a trois changements de section. Pour la section sur pile, les épaisseurs de semelle inférieure et supérieure sont celles données par le prédimensionnement avec 20mm d'épaisseur d'âme. Ensuite, pour la deuxième variation de section de la travée centrale, les épaisseurs de semelle inférieure et supérieure sont égales à  $\frac{2}{3}$  des épaisseurs de semelle calculées sur pile avec 18mm d'épaisseur d'âme. Pour la troisième variation de section de la travée centrale, les épaisseurs de semelle inférieure et supérieure sont égales à  $\frac{1}{3}$  de l'épaisseur calculée dans la deuxième variation de section adjacente avec 18mm d'épaisseur d'âme.

Pour les travées de rive de  $0,85L$  de portée, il y a 3 changements de sections.

Pour la section la plus proche de l'appui, les épaisseurs de semelle inférieure et supérieure sont celles déterminées dans la section centrale de la travée centrale avec 18mm d'épaisseur d'âme.

Pour la section centrale (0,1x0,85L-0,8x0,85L), les épaisseurs de semelle inférieure et supérieure sont celles déterminées en travée centrale dans les zones (0,2L-0,3L et 0,7L-0,8L) avec 18mm d'épaisseur d'âme.

Pour la section sur pile, les épaisseurs de semelle inférieure et supérieure sont celles déterminées dans la travée centrale dans les zones (0-0,2L et 0,8L-L) avec 20mm d'épaisseur d'âme.

## I.2. Méthodologie et critères de prédimensionnement

La gamme de portée envisagée pour le prédimensionnement est comprise entre 30 et 80 m.

Le profil en travers retenu pour le tablier est un profil autoroutier. Ce type de profil permet d'assurer un excentrement des charges du modèle LM1.

Les sollicitations prises en compte pour le prédimensionnement sont les charges permanentes uniformément réparties sur tout l'ouvrage, les charges ponctuelles liées au modèle de charge LM1 (les tandems sont supposés être excentrés mais centrés dans leurs voies), les charges ponctuelles liées au modèle de fatigue FLM3, le moment de retrait du béton et le moment généré par le gradient thermique. Ces sollicitations ont été calculées à partir des formules de la RDM.

Concernant la sollicitation de retrait  $\varepsilon_r$ , c'est le retrait à court terme qui est le plus défavorable. Ce retrait génère un moment isostatique qui a pour expression  $M_{retrait} = E\varepsilon_r S_b \left( \frac{e_{Hourdis}}{2} + H - y_G \right)$ .

Pour le cas des structures hyperstatiques, c'est le théorème des 3 moments qui a été employé pour le calcul des sollicitations sur pile.

Les sollicitations générées par le gradient thermique sont calculées en appliquant une méthode analogue.

Le calcul de la répartition transversale des efforts a permis d'identifier et réaliser le prédimensionnement avec la poutre la plus sollicitée. Il s'agit de la poutre de rive.

Le prédimensionnement porte sur la hauteur de poutres. Les sections les plus sollicitées ont été étudiées en considérant les chargements les plus défavorables. Pour l'ouvrage isostatique, c'est la section à mi travée qui est dimensionnante. Pour les ouvrages à 2 et 3 travées, la section dimensionnante est la section sur pile.

Le prédimensionnement a été réalisé en suivant le texte normatif directeur de la partie 2 de l'Eurocode 4. A l'état limite de service (ELS), le prédimensionnement a consisté à vérifier que les contraintes sollicitantes ne dépassent pas les contraintes limites associées aux matériaux (béton, aciers passifs, acier de charpente).

A l'état limite ultime (ELU), le prédimensionnement a été mené en tenant compte de la résistance en section, de la résistance au voilement par cisaillement, de la résistance au déversement et pour les poutres P.R.S de la résistance à la fatigue. La vérification au voilement par cisaillement a permis de confirmer les épaisseurs d'âme des poutres.

Le prédimensionnement a consisté à déterminer la hauteur de P.R.S ou le profilé optimal qui permet de tangenter l'ensemble des critères. Une routine de calcul de type macro Excel a été élaborée afin de pouvoir déterminer la hauteur de P.R.S ou le profilé optimal qui permet d'optimiser l'ensemble de ces critères. Dans le cas des P.R.S, la hauteur de poutre H était réduite par pas jusqu'à ce qu'un des critères de prédimensionnement ne soit plus vérifié.

Pour le cas isostatique, les critères de prédimensionnement sont les suivants :

- Classe de la section 1 ou 2 au plus
- A l'ELU  $M_{ELU} < M_{pl,Rd}$
- A l'ELU de fatigue  $\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta \sigma_c}{\gamma_{Mf}}$
- A l'ELS fréquent  $\sigma < 0,75 f_y$  (rupture fragile)
- A l'ELS caractéristique  $\sigma \leq \frac{f_y}{\gamma_{M,ser}}$

La vérification à l'ELU de fatigue consiste à vérifier que la ruine de l'ouvrage par propagation de fissures est peu probable. C'est le modèle de charge FLM3 qui permet de calculer les sollicitations de fatigue. On fait l'hypothèse d'un trafic de longue distance. On s'intéresse aux semelles inférieure et supérieure des poutres. On retient une classe de détail égale à 80 MPa pour la semelle inférieure et 56 MPa pour la semelle supérieure.

Pour les cas hyperstatiques, les critères de prédimensionnement sont les suivants :

- Classe de la section au plus 3
- Déversement à l'ELU  $\sigma_{ELU} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \chi_{LT}$  (ici limite fixée à 280 MPa)
- A l'ELU de fatigue  $\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta \sigma_c}{\gamma_{Mf}}$
- A l'ELS fréquent  $\sigma < 0,75 f_y$  (rupture fragile)
- A l'ELS caractéristique  $\sigma \leq \frac{f_y}{\gamma_{M,ser}}$

Sur pile la section de béton est fissurée, seules les armatures longitudinales participent à la résistance. La semelle inférieure est comprimée. La vérification au déversement consiste donc à vérifier que la semelle inférieure ne risque pas de flamber latéralement. Pour le calcul nous avons d'abord utilisé la méthode simplifiée d'Engesser puis nous avons fixé la contrainte limite de déversement à 280 MPa de manière à se rapprocher des hauteurs données par le guide de conception des ouvrages bipoutres mixtes.

Après calcul des hauteurs optimales, des formules du type  $\alpha(L) \left(\frac{L_t}{n}\right)^{\beta(L)}$  ont été recherchées pour le prédimensionnement de la hauteur de poutre, par analogie avec la formule de la hauteur de poutre pour un bipoutre mixte dans le BOA n°66. Les coefficients  $\alpha(L)$  et  $\beta(L)$  sont déterminés à partir des coefficients des courbes de tendance.

## II. Présentation des résultats

### II.1. Pour les tabliers à poutres reconstituées soudées (P.R.S)

La coupe transversale type utilisée est donnée par la Figure 4. Les poutres sont entretoisées.

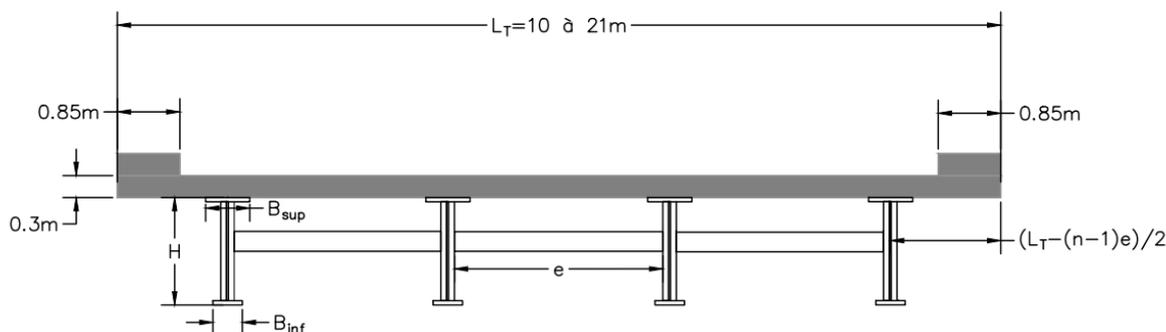


Figure 4 : Profil en travers retenu – Cas particulier n=4 poutres

Les tableaux ci-dessous présentent les résultats obtenus pour le cas particulier des multipoutres.

#### II.1.1 Tablier à une seule travée isostatique de portée comprise entre 30 et 80 m

Hauteur des poutres H (m)	$(0,017L + 0,1) \left(\frac{L_T}{n}\right)^{0,5}$ , n le nombre de poutres (jusqu'à n=8)
Entraxe des poutres (m)	Arrondi à 1 décimale du rapport $\frac{L_T}{n}$
Largeur des semelles inf. B <sub>inf</sub> (m)	$0,1 + \frac{L_T}{20n} + \frac{L}{125}$ Si n > 2
Largeur des semelles sup. B <sub>sup</sub> (m)	B <sub>inf</sub> - 0,1 Si tablier à deux voies B <sub>inf</sub> - 0,2 Si tablier à plus de deux voies
Epaisseur semelles inf. et sup. à mi-travée (m)	$\left(\frac{4}{5} \times L + 26\right) \times 10^{-3}$
Entretoises courantes	IPE 500 à IPE 700 ou équivalent
Tonnage charpente (kg/m <sup>2</sup> de tablier)	$(0,058L^2 + 9,71L + 4,74) \times \left(\frac{L_T}{n}\right)^{-0,0032L-0,44}$

Tableau 1 : Tableau de prédimensionnement – travée isostatique

### II.1.2. Tablier à deux travées continues de portées égales comprises entre 30 et 80 m

Hauteur des poutres H (m)	$(0,018L + 0,2) \times \left(\frac{L_T}{n}\right)^{0,45}$ , $n$ le nombre de poutres (jusqu'à $n=8$ )
Entraxe des poutres (m)	Arrondi à 1 décimale du rapport $\frac{L_T}{n}$
Largeur des semelles inf. $B_{inf}$ (m)	$0,1 + \frac{L_T}{20n} + \frac{L}{125}$ Si $n > 2$
Largeur des semelles sup. $B_{sup}$ (m)	$B_{inf} - 0,1$ Si tablier à deux voies $B_{inf} - 0,2$ Si tablier à plus de deux voies
Epaisseur semelles inf. et sup. sur pile (m)	$\min\left(0,08 + 0,04 \times \frac{H - 1}{2,8 - 1}; 0,11^*\right)$ *valeur définie pour le recalage avec la formule du guide bipoutre
Entretoises courantes	IPE 500 à IPE 700 ou équivalent
Tonnage charpente (kg/m <sup>2</sup> de tablier)	$(0,073L^2 + 5,12L + 118,42) \times \left(\frac{L_T}{n}\right)^{-0,0041L - 0,3178}$

Tableau 2 : Tableau de prédimensionnement – 2 travées égales

### II.1.3. Tablier à trois travées continues (portée respective des travées 0,85L-L-0,85L) comprises entre 30 et 80m

Hauteur des poutres H (m)	$(0,016L + 0,15)\left(\frac{L_T}{n}\right)^{0,42}$ , $n$ le nombre de poutres (jusqu'à $n=8$ )
Entraxe des poutres (m)	Arrondi à 1 décimale du rapport $\frac{L_T}{n}$
Largeur des semelles inf. $B_{inf}$ (m)	$0,1 + \frac{L_T}{20n} + \frac{L}{125}$ Si $n > 2$
Largeur des semelles sup. $B_{sup}$ (m)	$B_{inf} - 0,1$ Si tablier à deux voies $B_{inf} - 0,2$ Si tablier à plus de deux voies
Epaisseur semelles inf. et sup. sur pile (m)	$\min\left(0,08 + 0,04 \times \frac{H - 1}{2,8 - 1}; 0,12^*\right)$ *valeur définie pour le recalage avec la formule du guide bipoutre
Entretoises courantes	IPE 500 à IPE 700 ou équivalent
Tonnage charpente (kg/m <sup>2</sup> de tablier)	$(0,063L^2 + 4,14L + 133)\left(\frac{L_T}{n}\right)^{-0,002L - 0,3859}$

Tableau 3 : Tableau de prédimensionnement – 3 travées de portées respectives 0,85L-L-0,85L

## II.2. Pour les tabliers à profilés laminés

Les tableaux ci-dessous donnent les portées maximales pouvant être atteintes pour différentes gammes de profilés (« HE », « HL », « UB ») pour les différents schémas statiques considérés. Les cases rayées signifient que le profilé en question ne peut pas être utilisé. Dans chaque gamme, tous les profilés ont été étudiés. Pour la gamme de profilés « HE », il s'agit des profilés « HE 1000 584 » à « HE 700 AA 150 ». Pour la gamme de profilés « HL », il s'agit des profilés « HL 1100 607 » à « HL 920 344 ». Pour la gamme de profilés « UB », il s'agit des profilés « UB 1100 607 » à « UB 690 217 ». Les tableaux présentent uniquement les profilés utilisables. Les tableaux ci-dessous sont donnés pour une unique largeur de tablier de référence  $L_T=12m$ .

### II.2.1. Travée isostatique

Gamme de poutrelles européennes à larges ailes « HE »

Type de profilés		Hauteur du profilé (m)	Nombre de poutres						
			2	3	4	5	6	7	8
HE 1000	584*	1,056	17	27	30	33	35	38	41
HE 1000	494	1,036	15	19	27	30	32	34	37
HE 1000	438	1,026	X	18	25	28	30	32	33
HE 1000	415	1,02	X	18	18	27	29	31	32
HE 1000	393	1,016	X	17	18	26	28	30	31
HE 1000 M	349	1,008	X	17	17	24	26	28	29
HE 1000 B	314	1	X	16	17	17	24	26	27
HE 1000 A	272	0,99	X	15	16	16	17	23	25
HE 1000	249	0,98	X	15	16	16	17	22	23
HE 1000 AA	222	0,97	X	15	16	16	17	17	21
HE 900	466	0,938	X	17	25	27	29	31	33
HE 900	391	0,922	X	16	16	24	26	28	29
HE 900 M	333	0,91	X	15	16	22	24	25	27
HE 900 B	291	0,9	X	15	15	15	22	23	24
HE 900 A	252	0,89	X	X	15	15	15	21	22
HE 900 AA	198	0,87	X	X	X	15	15	16	16
HE 800	444	0,842	X	16	23	25	27	28	30
HE 800	373	0,826	X	15	15	22	24	25	26
HE 800 M	317	0,814	X	X	X	X	21	23	24
HE 800 B	262	0,8	X	X	X	X	X	20	21
HE 800 A	224	0,79	X	X	X	X	X	X	19
HE 700	418	0,744	X	X	X	22	24	25	27
HE 700	352	0,728	X	X	X	20	21	22	24
HE 700 M	301	0,716	X	X	X	X	19	20	21
HE 700 B	241	0,7	X	X	X	X	X	17	18

\*masse du profilé en kg/ml

Tableau 4 : Portée maximale (m) pouvant être atteinte en fonction du nombre de poutres du tablier- Gamme de profilés HE - Ouvrage isostatique

Gamme de poutrelles européennes à très larges ailles « HL »

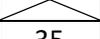
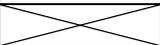
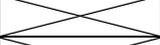
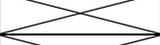
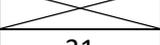
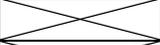
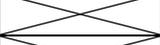
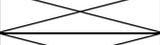
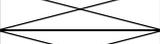
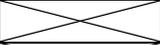
Type de profilés		Hauteur du profilé (m)	Nombre de poutres						
			2	3	4	5	6	7	8
HL 1100	607	1,138	17	29	32	35	38	41	45
HL 1100	548	1,128	16	19	31	33	36	38	41
HL 1100 R	499	1,118	15	19	29	31	34	36	39
HL 1100 M	433	1,108		18	27	29	31	34	35
HL 1100 B	390	1,1		17	18	27	29	31	33
HL 1100 A	343	1,09		17	17	25	27	29	31
HL 1000	976	1,108	31	36	40	44	48	52	55
HL 1000	883	1,092	29	34	38	41	45	49	52
HL 1000	748	1,068	18	31	35	38	41	45	48
HL 1000	642	1,048	15	29	32	35	37	40	43
HL 1000	591	1,04		27	30	33	36	38	41
HL 1000	554	1,032		18	29	32	34	36	39
HL 1000	539	1,03		18	29	31	34	36	38
HL 1000	483	1,02		17	27	29	31	34	35
HL 1000	443	1,012		17	25	28	30	32	33
HL 1000 M	412	1,008		16	24	27	29	31	32
HL 1000 B	371	1		16	16	25	27	29	30
HL 1000 A	321	0,99		15	16	16	24	26	27
HL 1000 AA	296	0,982		15	16	16	23	25	26
HL 920	1377	1,093	35	41	47	51	54	57	59
HL 920	1269	1,093	34	39	44	49	53	57	60
HL 920	1194	1,081	33	38	42	47	52	55	58
HL 920	1077	1,061	32	37	41	45	49	53	56
HL 920	970	1,043	30	35	38	42	46	50	53
HL 920	787	1,011	19	31	34	37	40	44	47
HL 920	725	0,999	17	29	33	36	38	42	45
HL 920	656	0,987	15	28	31	34	37	39	42
HL 920	588	0,975		26	29	32	34	37	39
HL 920	537	0,965		17	27	30	32	35	36
HL 920	491	0,957		16	26	28	31	33	34
HL 920	449	0,948		16	25	27	29	31	33
HL 920	420	0,943		16	24	26	28	30	32
HL 920	390	0,936		16	16	25	27	28	30
HL 920	368	0,931		15	16	24	26	27	29
HL 920	344	0,927		15	15	23	24	26	28

Tableau 5 : Portée maximale (m) pouvant être atteinte en fonction du nombre de poutres du tablier- Gamme de profilés HL - Ouvrage isostatique

Gamme de profilés britanniques « UB »

			Nombre de poutres						
Type de profilés		Hauteur du profilé (m)	2	3	4	5	6	7	8
UB 1100	607	1,138	17	29	32	35	38	41	45
UB 1100	548	1,128	16	19	31	33	36	38	41
UB 1100	499	1,118	15	19	29	31	34	36	39
UB 1100	433	1,108		18	27	29	31	34	35
UB 1100	390	1,1		17	18	27	29	31	33
UB 1100	343	1,09		17	17	25	27	29	31
UB 1016	584	1,056	17	27	30	33	35	38	41
UB 1016	494	1,036	15	19	27	30	32	34	37
UB 1016	438	1,026		18	25	28	30	32	33
UB 1016	415	1,02		18	18	27	29	31	32
UB 1016	393	1,016		17	18	26	28	30	31
UB 1016	350	1,008		17	17	24	26	28	29
UB 1016	314	1		16	17	17	24	26	27
UB 1016	272	0,99		15	16	16	17	23	25
UB 1016	249	0,98		15	16	16	17	22	23
UB 1016	222	0,97		15	16	16	17	17	22
UB 1000	976	1,108	31	36	40	44	48	52	55
UB 1000	883	1,092	29	34	38	41	45	49	52
UB 1000	748	1,068	18	31	35	38	41	45	48
UB 1000	642	1,048	15	29	32	35	37	40	43
UB 1000	591	1,04		27	30	33	36	38	41
UB 1000	554	1,032		18	29	32	34	36	39
UB 1000	539	1,03		18	29	31	34	36	38
UB 1000	483	1,02		17	27	29	31	34	35
UB 1000	443	1,012		17	25	28	30	32	33
UB 1000	412	1,008		16	24	27	29	31	32
UB 1000	371	1		16	16	25	27	29	30
UB 1000	321	0,99		15	16	16	24	26	27
UB 1000	296	0,982		15	16	16	23	25	26
UB 920	1377	1,093	35	41	47	51	54	57	59
UB 920	1269	1,093	34	39	44	49	53	57	60
UB 920	1194	1,081	33	38	42	47	52	55	58
UB 920	1077	1,061	32	37	41	45	49	53	56
UB 920	970	1,043	30	35	38	42	46	50	53
UB 920	787	1,011	19	31	34	37	40	44	47
UB 920	725	0,999	17	29	33	36	38	42	45
UB 920	656	0,987	15	28	31	34	37	39	42
UB 920	588	0,975		26	29	32	34	37	39
UB 920	537	0,965		17	27	30	32	35	36
UB 920	491	0,957		16	26	28	31	33	34

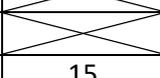
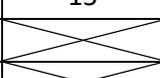
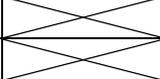
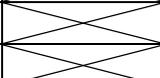
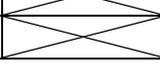
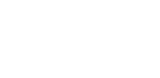
UB 920	449	0,948		16	25	27	29	31	33
UB 920	420	0,943		16	24	26	28	30	32
UB 920	390	0,936		16	16	25	27	28	30
UB 920	368	0,931		15	16	24	26	27	29
UB 920	344	0,927		15	15	23	24	26	28
UB 914	576	0,993	15	26	29	31	34	36	39
UB 914	521	0,981		18	27	30	32	34	37
UB 914	474	0,971		18	26	28	30	32	34
UB 914	425	0,961		17	24	26	28	30	32
UB 914	381	0,951		16	17	24	26	28	30
UB 914	345	0,943		16	16	23	25	27	28
UB 914	313	0,932		16	16	16	23	25	26
UB 914	289	0,9266		15	16	16	22	23	25
UB 914	271	0,923		15	16	16	16	23	24
UB 914	253	0,9184		15	15	16	16	22	23
UB 914	238	0,915		15	15	15	16	21	22
UB 914	224	0,9104		15	15	15	16	16	21
UB 914	201	0,903			15	15	16	16	16

Tableau 6 : Portée maximale (m) pouvant être atteinte en fonction du nombre de poutres du tablier- Gamme de profilés UB - Ouvrage isostatique

## II.2.2. Deux travées continues d'égales portées

Gamme de poutrelles européennes à larges ailes « HE »

Type de profilés		Hauteur du profilé (m)	Nombre de poutres						
			2	3	4	5	6	7	8
HE 1000	584*	1,056					15	18	21
HE 1000	415	1,02	23	28	31	34	37	39	42
HE 1000	393	1,016	22	26	30	33	35	37	39

\*masse du profilé en kg/ml

Tableau 7 : Portée maximale (m) pouvant être atteinte en fonction du nombre de poutres du tablier- Gamme de profilés HE - Ouvrage à 2 travées égales

Gamme de poutrelles européennes à très larges ailles « HL »

Type de profilés		Hauteur du profilé (m)	Nombre de poutres						
			2	3	4	5	6	7	8
HL 1100	607	1,138						19	23
HL 1100	548	1,128						16	20
HL 1100 R	499	1,118							16
HL 1000	976	1,108			17	23	28	32	35
HL 1000	883	1,092				20	25	29	33
HL 1000	748	1,068				15	21	25	28
HL 1000	642	1,048					16	20	24
HL 1000	591	1,04						18	21
HL 1000	554	1,032						16	19
HL 1000	539	1,03						15	19
HL 1000	483	1,02							15
HL 920	1377	1,093		18	25	31	35	39	42
HL 920	1269	1,093		17	25	31	35	39	42
HL 920	1194	1,081		16	23	29	34	37	41
HL 920	1077	1,061			20	26	31	35	38
HL 920	970	1,043			17	23	28	32	35
HL 920	787	1,011				17	22	26	30
HL 920	725	0,999				15	20	24	27
HL 920	656	0,987					17	21	25
HL 920	588	0,975						18	22
HL 920	537	0,965						15	19
HL 920	491	0,957							16

Tableau 8 : Portée maximale (m) pouvant être atteinte en fonction du nombre de poutres du tablier- Gamme de profilés HL - Ouvrage à 2 travées égales

Gamme de profilés britanniques « UB »

Type de profilés			Nombre de poutres						
			2	3	4	5	6	7	8
UB 1100	607	1,138						19	23
UB 1100	548	1,128						16	20
UB 1100	499	1,118							16
UB 1016	584	1,056							17
UB 1000	976	1,108			17	23	28	32	35
UB 1000	883	1,092				20	25	29	33
UB 1000	748	1,068				15	21	25	28
UB 1000	642	1,048					16	20	24
UB 1000	591	1,04						18	21
UB 1000	554	1,032						16	19
UB 1000	539	1,03						15	19
UB 1000	483	1,02							15
UB 920	1377	1,093		18	25	31	35	39	42
UB 920	1269	1,093		17	25	31	35	39	42
UB 920	1194	1,081		16	23	29	34	37	41
UB 920	1077	1,061			20	26	31	35	38
UB 920	970	1,043			17	23	28	32	35
UB 920	787	1,011				17	22	26	30
UB 920	725	0,999				15	20	24	27
UB 920	656	0,987					17	21	25
UB 920	588	0,975						18	22
UB 920	537	0,965						15	19
UB 920	491	0,957							16
UB 914	576	0,993							17

Tableau 9 : Portée maximale (m) pouvant être atteinte en fonction du nombre de poutres du tablier- Gamme de profilés UB - Ouvrage à 2 travées égales

### II.2.3. Trois travées continues (portée respective des travées 0,85L-L-0,85L)

Gamme de poutrelles européennes à larges ailes « HE »

Type de profilés		Hauteur du profilé (m)	Nombre de poutres						
			2	3	4	5	6	7	8
HE 1000	584*	1,056		21	27	32	36	40	43
HE 1000	494	1,036		15	21	26	31	34	38
HE 1000	438	1,026			18	23	28	31	35
HE 1000	415	1,02	30	36	41	45	48	51	54
HE 1000	393	1,016	28	34	39	43	46	49	51
HE 1000 M	349	1,008				19	23	27	30
HE 1000 B	314	1				16	20	24	27
HE 1000 A	272	0,99					17	21	24
HE 1000	249	0,98						17	20
HE 1000 AA	222	0,97							16
HE 900	466	0,938			19	24	28	32	35
HE 900	391	0,922			15	20	24	28	31
HE 900 M	333	0,91				17	21	24	27
HE 900 B	291	0,9					18	21	24
HE 900 A	252	0,89					15	18	21
HE 800	444	0,842			17	22	26	29	32
HE 800	373	0,826				18	22	26	29
HE 800 M	317	0,814				15	19	22	25
HE 800 B	262	0,8					15	18	21
HE 800 A	224	0,79						15	18
HE 700	418	0,744			15	19	23	27	29
HE 700	352	0,728				16	20	23	26
HE 700 M	301	0,716					17	20	23
HE 700 B	241	0,7						15	18
HE 700 A	204	0,69							15

\*masse du profilé en kg/ml

Tableau 10 : Portée maximale (m) pouvant être atteinte en fonction du nombre de poutres du tablier-  
Gamme de profilés HE - Ouvrage à 3 travées

Gamme de poutrelles européennes à très larges ailles « HL »

Type de profilés			Nombre de poutres						
			Hauteur du profilé (m)	2	3	4	5	6	7
HL 1100	607	1,138		22	29	35	40	44	47
HL 1100	548	1,128		20	27	32	37	41	45
HL 1100 R	499	1,118		17	24	30	34	38	42
HL 1100 M	433	1,108			21	27	31	35	39
HL 1100 B	390	1,1			19	24	28	32	36
HL 1100 A	343	1,09			15	20	25	29	32
HL 1000	976	1,108		23	33	40	46	51	59
HL 1000	883	1,092		20	30	38	43	48	56
HL 1000	748	1,068		15	26	33	39	44	51
HL 1000	642	1,048			22	29	35	39	47
HL 1000	591	1,04			21	27	33	38	45
HL 1000	554	1,032			19	26	31	36	43
HL 1000	539	1,03			18	25	31	35	43
HL 1000	483	1,02			16	23	28	32	40
HL 1000	443	1,012			20	26	30	34	37
HL 1000 M	412	1,008			19	25	29	33	36
HL 1000 B	371	1			17	22	27	30	34
HL 1000 A	321	0,99				19	23	27	30
HL 1000 AA	296	0,982				16	20	24	27
HL 920	1377	1,093		29	39	46	52	56	63
HL 920	1269	1,093		29	39	46	52	57	65
HL 920	1194	1,081		27	37	45	51	56	63
HL 920	1077	1,061		25	35	42	48	53	61
HL 920	970	1,043		22	32	39	45	50	58
HL 920	787	1,011		17	27	34	40	44	52
HL 920	725	0,999			25	32	37	42	50
HL 920	656	0,987			23	30	35	40	47
HL 920	588	0,975			20	27	32	37	44
HL 920	537	0,965			18	25	30	34	42
HL 920	491	0,957			16	23	28	32	40
HL 920	449	0,948				21	26	30	37
HL 920	420	0,943				19	24	28	35
HL 920	390	0,936				17	22	26	33
HL 920	368	0,931				16	21	25	32
HL 920	344	0,927					19	23	30

Tableau 11 : Portée maximale (m) pouvant être atteinte en fonction du nombre de poutres du tablier-  
Gamme de profilés HL - Ouvrage à 3 travées

Gamme de profilés britanniques « UB »

Type de profilés		Hauteur du profilé (m)	Nombre de poutres						
			2	3	4	5	6	7	8
UB 1100	607	1,138		22	29	35	40	44	47
UB 1100	548	1,128		20	27	32	37	41	45
UB 1100	499	1,118		17	24	30	34	38	42
UB 1100	433	1,108			21	27	31	35	39
UB 1100	390	1,1			19	24	29	32	36
UB 1100	343	1,09			15	20	25	29	32
UB 1016	584	1,056		18	25	30	35	38	42
UB 1016	494	1,036			21	26	30	34	37
UB 1016	438	1,026			18	23	28	31	35
UB 1016	415	1,02			17	22	26	30	33
UB 1016	393	1,016			15	21	25	29	32
UB 1016	350	1,008				19	23	27	30
UB 1016	314	1				16	20	24	27
UB 1016	272	0,99					17	21	24
UB 1016	249	0,98						17	20
UB 1016	222	0,97							16
UB 1000	976	1,108	23	33	40	46	51	55	59
UB 1000	883	1,092	20	30	38	43	48	52	56
UB 1000	748	1,068	15	26	33	39	44	48	51
UB 1000	642	1,048		22	29	35	39	43	47
UB 1000	591	1,04		21	27	33	38	42	45
UB 1000	554	1,032		19	26	31	36	40	43
UB 1000	539	1,03		18	25	31	35	39	43
UB 1000	483	1,02		16	23	28	32	36	40
UB 1000	443	1,012			20	26	30	34	37
UB 1000	412	1,008			19	25	29	33	36
UB 1000	371	1			17	22	27	30	34
UB 1000	321	0,99				19	23	27	30
UB 1000	296	0,982				16	20	24	27
UB 920	1377	1,093	29	39	46	52	56	60	63
UB 920	1269	1,093	29	39	46	52	57	62	65
UB 920	1194	1,081	27	37	45	51	56	60	63
UB 920	1077	1,061	25	35	42	48	53	57	61
UB 920	970	1,043	22	32	39	45	50	54	58
UB 920	787	1,011	17	27	34	40	44	48	52
UB 920	725	0,999		25	32	37	42	46	50
UB 920	656	0,987		23	30	35	40	44	47
UB 920	588	0,975		20	27	32	37	41	44
UB 920	537	0,965		18	25	30	34	38	42
UB 920	491	0,957		16	23	28	32	36	40

UB 920	449	0,948			21	26	30	34	37
UB 920	420	0,943			19	24	28	32	35
UB 920	390	0,936			17	22	26	30	33
UB 920	368	0,931			16	21	25	28	32
UB 920	344	0,927				19	23	27	30
UB 914	576	0,993		17	24	29	34	37	41
UB 914	521	0,981		15	22	27	31	35	38
UB 914	474	0,971			20	25	29	33	36
UB 914	425	0,961			17	22	27	30	33
UB 914	381	0,951			15	20	24	28	31
UB 914	345	0,943				18	22	25	28
UB 914	313	0,932				15	19	22	25
UB 914	289	0,9266					17	20	23
UB 914	271	0,923					16	19	22
UB 914	253	0,9184						17	20
UB 914	238	0,915						16	19
UB 914	224	0,9104							17

Tableau 12 : Portée maximale (m) pouvant être atteinte en fonction du nombre de poutres du tablier-  
Gamme de profilés UB - Ouvrage à 3 travées

### II.3. Pour les tabliers à poutres caissons

Les tableaux ci-dessous donnent les portées maximales pouvant être atteintes pour les différents schémas statiques considérés. Les tableaux ci-dessous sont donnés pour une unique largeur de tablier de référence  $L_T=12m$ .

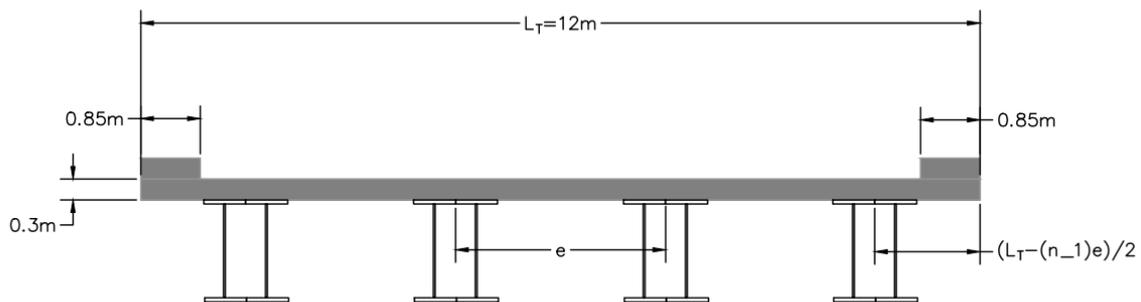


Figure 5 : Profil en travers retenu – Cas particulier  $n=4$  poutres caissons

### II.3.1. Travée isostatique

Poutres caissons fabriquées à partir de poutrelles européennes à larges ailes « HE »

Type de profilés		Hauteur du profilé (m)	Nombre de caissons						
			2	3	4	5	6	7	8
HE 1000	584*	1,056	18	29	32	35	38	41	44
HE 1000	494	1,036	15	20	29	32	35	37	40
HE 1000	438	1,026		19	27	30	32	34	36
HE 1000	415	1,02		19	19	29	31	33	35
HE 1000	393	1,016		18	19	28	30	32	34
HE 1000 M	349	1,008		17	18	26	28	30	31
HE 1000 B	314	1		17	18	18	26	28	29
HE 1000 A	272	0,99		16	17	17	18	25	27
HE 1000	249	0,98		16	17	18	18	24	25
HE 1000 AA	222	0,97		16	17	18	18	19	23
HE 900	466	0,938		18	27	29	31	33	35
HE 900	391	0,922		17	17	26	28	30	32
HE 900 M	333	0,91		16	17	24	26	27	29
HE 900 B	291	0,9		15	16	16	23	25	26
HE 900 A	252	0,89		15	15	16	16	23	24
HE 900 AA	198	0,87			15	16	16	17	17
HE 800	444	0,842		16	24	27	29	31	32
HE 800	373	0,826		15	16	24	26	27	29
HE 800 M	317	0,814		15	15	15	23	25	26
HE 800 B	262	0,8				15	15	22	23
HE 800 A	224	0,79					15	15	21
HE 800 AA	172	0,77					15	15	15
HE 700	418	0,744		15	15	24	26	27	29
HE 700	352	0,728				21	23	24	26
HE 700 M	301	0,716					21	22	23
HE 700 B	241	0,7						19	20

\*masse du profilé en kg/ml

Tableau 13 : Portée maximale (m) pouvant être atteinte - Poutres caissons HE – Ouvrage isostatique

Poutres caissons fabriquées à partir de poutrelles européennes à très larges ailes « HL »

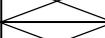
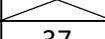
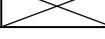
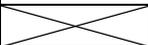
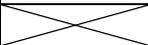
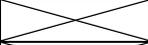
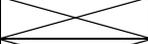
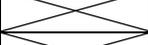
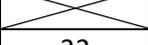
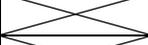
			Nombre de caissons						
Type de profilés		Hauteur du profilé (m)	2	3	4	5	6	7	8
HL 1100	607	1,138	18	31	35	38	41	44	48
HL 1100	548	1,128	16	20	33	36	39	41	44
HL 1100 R	499	1,118	15	20	31	34	37	39	41
HL 1100 M	433	1,108		19	29	31	34	36	38
HL 1100 B	390	1,1		18	19	29	32	34	36
HL 1100 A	343	1,09		18	18	27	29	31	33
HL 1000	976	1,108	32	38	43	47	52	55	58
HL 1000	883	1,092	30	36	40	44	49	52	55
HL 1000	748	1,068	18	33	37	41	44	48	51
HL 1000	642	1,048	16	31	34	37	40	43	46
HL 1000	591	1,04		29	33	36	38	41	44
HL 1000	554	1,032		19	31	34	37	39	42
HL 1000	539	1,03		19	31	34	36	39	41
HL 1000	483	1,02		18	29	31	34	36	38
HL 1000	443	1,012		18	27	30	32	34	36
HL 1000 M	412	1,008		17	26	29	31	33	35
HL 1000 B	371	1		17	17	27	29	31	33
HL 1000 A	321	0,99		16	17	17	26	28	30
HL 1000 AA	296	0,982		16	17	17	25	27	28
HL 920	1377	1,093	37	44	50	56	60	63	67
HL 920	1269	1,093	36	42	47	53	57	61	64
HL 920	1194	1,081	35	41	46	51	55	59	62
HL 920	1077	1,061	33	39	44	49	53	57	60
HL 920	970	1,043	31	37	41	45	50	53	56
HL 920	787	1,011	19	33	37	40	43	47	50
HL 920	725	0,999	17	32	35	39	41	45	48
HL 920	656	0,987	15	30	34	37	39	42	45
HL 920	588	0,975		28	31	34	37	39	42
HL 920	537	0,965		18	30	32	35	37	39
HL 920	491	0,957		17	28	31	33	35	37
HL 920	449	0,948		17	26	29	31	33	35
HL 920	420	0,943		16	26	28	30	32	34
HL 920	390	0,936		16	17	27	29	31	32
HL 920	368	0,931		16	17	26	28	30	31
HL 920	344	0,927		16	16	25	27	28	30

Tableau 14 : Portée maximale (m) pouvant être atteinte - Poutres caissons HL – Ouvrage isostatique

Poutres caissons fabriquées à partir de profilés britanniques « UB »

			Nombre de caissons						
Type de profilés		Hauteur du profilé (m)	2	3	4	5	6	7	8
UB 1100	607	1,138	18	31	35	38	41	44	48
UB 1100	548	1,128	16	20	33	36	39	41	44
UB 1100	499	1,118	15	20	31	34	37	39	41
UB 1100	433	1,108		19	29	31	34	36	38
UB 1100	390	1,1		18	19	29	32	34	36
UB 1100	343	1,09		18	18	27	29	31	33
UB 1016	584	1,056	18	29	32	35	38	41	44
UB 1016	494	1,036	15	20	29	32	35	37	40
UB 1016	438	1,026		19	27	30	32	34	36
UB 1016	415	1,02		19	19	29	31	33	35
UB 1016	393	1,016		18	19	28	30	32	34
UB 1016	350	1,008		17	18	26	28	30	32
UB 1016	314	1		17	18	18	26	28	29
UB 1016	272	0,99		16	17	17	18	25	27
UB 1016	249	0,98		16	17	18	18	24	25
UB 1016	222	0,97		16	17	18	18	19	23
UB 1000	976	1,108	32	38	43	47	52	55	58
UB 1000	883	1,092	30	36	40	44	49	52	55
UB 1000	748	1,068	18	33	37	41	44	48	51
UB 1000	642	1,048	16	31	34	37	40	43	46
UB 1000	591	1,04		29	33	36	38	41	44
UB 1000	554	1,032		19	31	34	37	39	42
UB 1000	539	1,03		19	31	34	36	39	41
UB 1000	483	1,02		18	29	31	34	36	38
UB 1000	443	1,012		18	27	30	32	34	36
UB 1000	412	1,008		17	26	29	31	33	35
UB 1000	371	1		17	17	27	29	31	33
UB 1000	321	0,99		16	17	17	26	28	30
UB 1000	296	0,982		16	17	17	25	27	28
UB 920	1377	1,093	37	44	50	56	60	63	67
UB 920	1269	1,093	36	42	47	53	57	61	64
UB 920	1194	1,081	35	41	46	51	55	59	62
UB 920	1077	1,061	33	39	44	49	53	57	60
UB 920	970	1,043	31	37	41	45	50	53	56
UB 920	787	1,011	19	33	37	40	43	47	50
UB 920	725	0,999	17	32	35	39	41	45	48
UB 920	656	0,987	15	30	34	37	39	42	45
UB 920	588	0,975		28	31	34	37	39	42
UB 920	537	0,965		18	30	32	35	37	39
UB 920	491	0,957		17	28	31	33	35	37

UB 920	449	0,948		17	26	29	31	33	35
UB 920	420	0,943		16	26	28	30	32	34
UB 920	390	0,936		16	17	27	29	31	32
UB 920	368	0,931		16	17	26	28	30	31
UB 920	344	0,927		16	16	25	27	28	30
UB 914	576	0,993	15	28	31	34	36	39	42
UB 914	521	0,981		19	29	32	35	37	39
UB 914	474	0,971		18	28	30	33	35	36
UB 914	425	0,961		18	26	28	31	32	34
UB 914	381	0,951		17	18	26	28	30	32
UB 914	345	0,943		17	17	25	27	29	30
UB 914	313	0,932		16	17	18	25	27	28
UB 914	289	0,9266		16	17	17	24	25	27
UB 914	271	0,923		16	16	17	17	24	26
UB 914	253	0,9184		15	16	17	17	23	25
UB 914	238	0,915		15	16	17	17	22	24
UB 914	224	0,9104		15	16	17	17	17	23
UB 914	201	0,903		15	16	16	17	17	18

Tableau 15 : Portée maximale (m) pouvant être atteinte - Poutres caissons UB – Ouvrage isostatique

### II.3.2. Deux travées continues d'égales portées

Poutres caissons fabriquées à partir de poutrelles européennes à larges ailes « HE »

Type de profilés		Hauteur du profilé (m)	Nombre de caissons						
			2	3	4	5	6	7	8
HE 1000	584*	1,056		18	25	30	34	37	40
HE 1000	494	1,036				17	23	27	31
HE 1000	438	1,026					15	21	25
HE 1000	415	1,02		35	41	45	49	52	57
HE 1000	393	1,016		33	40	44	48	51	56
HE 1000 M	349	1,008							18
HE 900	466	0,938					17	23	27
HE 900	391	0,922						17	21
HE 900 M	333	0,91							16
HE 800	444	0,842					15	20	24
HE 800	373	0,826						15	19
HE 700	418	0,744						18	22
HE 700	352	0,728							16

\*masse du profilé en kg/ml

Tableau 16 : Portée maximale (m) pouvant être atteinte - Poutres caissons HE - Ouvrage à 2 travées égales

Poutres caissons fabriquées à partir de poutrelles européennes à très larges ailes « HL »

Type de profilés		Hauteur du profilé (m)	Nombre de caissons						
			2	3	4	5	6	7	8
HL 1100	607	1,138			17	26	32	37	41
HL 1100	548	1,128				22	28	33	37
HL 1100 R	499	1,118				17	24	30	34
HL 1100 M	433	1,108					19	25	30
HL 1100 B	390	1,1					15	21	26
HL 1100 A	343	1,09						15	20
HL 1000	976	1,108		25	34	41	46	50	54
HL 1000	883	1,092		21	31	38	43	47	51
HL 1000	748	1,068			25	32	38	42	46
HL 1000	642	1,048			19	27	33	37	41
HL 1000	591	1,04			16	24	30	35	39
HL 1000	554	1,032				22	28	33	37
HL 1000	539	1,03				21	27	32	36
HL 1000	483	1,02				17	23	28	33
HL 1000	443	1,012					20	25	29
HL 1000 M	412	1,008					18	23	28
HL 1000 B	371	1						20	24
HL 1000 A	321	0,99							19
HL 920	1377	1,093	21	34	42	48	52	56	58
HL 920	1269	1,093	20	34	43	49	53	57	60
HL 920	1194	1,081	18	32	41	47	52	55	59
HL 920	1077	1,061	15	29	37	44	49	53	56
HL 920	970	1,043		25	34	41	46	50	53
HL 920	787	1,011		17	27	34	39	44	47
HL 920	725	0,999			24	31	37	41	45
HL 920	656	0,987			21	28	34	38	42
HL 920	588	0,975			16	24	30	35	39
HL 920	537	0,965				21	27	32	36
HL 920	491	0,957				18	24	29	33
HL 920	449	0,948					21	26	30
HL 920	420	0,943					18	23	28
HL 920	390	0,936					15	20	25
HL 920	368	0,931						18	22
HL 920	344	0,927						15	20

Tableau 17 : Portée maximale (m) pouvant être atteinte - Poutres caissons HL - Ouvrage à 2 travées égales

Poutres caissons fabriquées à partir de profilés britanniques « UB »

Type de profilés		Hauteur du profilé (m)	Nombre de caissons						
			2	3	4	5	6	7	8
UB 1100	607	1,138			17	26	32	37	41
UB 1100	548	1,128				22	28	34	38
UB 1100	499	1,118				18	24	30	34
UB 1100	433	1,108					20	25	30
UB 1100	390	1,1					15	21	26
UB 1100	343	1,09						16	21
UB 1016	584	1,056				19	26	30	34
UB 1016	494	1,036					19	24	29
UB 1016	438	1,026					15	21	25
UB 1016	415	1,02						18	23
UB 1016	393	1,016						16	21
UB 1016	350	1,008							18
UB 1000	976	1,108		25	34	41	46	50	54
UB 1000	883	1,092		21	31	38	43	47	51
UB 1000	748	1,068			25	32	38	42	46
UB 1000	642	1,048			19	27	33	37	41
UB 1000	591	1,04			16	24	30	35	39
UB 1000	554	1,032				22	28	33	37
UB 1000	539	1,03				21	27	32	36
UB 1000	483	1,02				17	23	28	33
UB 1000	443	1,012					20	25	29
UB 1000	412	1,008					18	23	28
UB 1000	371	1						20	24
UB 1000	321	0,99							19
UB 920	1377	1,093	21	34	42	48	52	56	58
UB 920	1269	1,093	20	34	43	49	53	57	60
UB 920	1194	1,081	18	32	41	47	52	55	59
UB 920	1077	1,061	15	29	37	44	49	53	56
UB 920	970	1,043		25	34	41	46	50	53
UB 920	787	1,011		17	27	34	39	44	47
UB 920	725	0,999			24	31	37	41	45
UB 920	656	0,987			21	28	34	38	42
UB 920	588	0,975			16	24	30	35	39
UB 920	537	0,965				21	27	32	36
UB 920	491	0,957				18	24	29	33
UB 920	449	0,948					21	26	30
UB 920	420	0,943					18	23	28
UB 920	390	0,936					15	20	25
UB 920	368	0,931						18	22
UB 920	344	0,927						15	20

UB 914	576	0,993				19	25	30	34
UB 914	521	0,981				15	22	27	31
UB 914	474	0,971					18	24	28
UB 914	425	0,961						20	24
UB 914	381	0,951						16	20
UB 914	345	0,943							17

Tableau 18 : Portée maximale (m) pouvant être atteinte - Poutres caissons UB - Ouvrage à 2 travées égales

### II.3.3. Trois travées continues (portée respective des travées 0,85L-L-0,85L)

Poutres caissons fabriquées à partir de poutrelles européennes à larges ailes « HE »

Type de profilés		Hauteur du profilé (m)	Nombre de caissons						
			2	3	4	5	6	7	8
HE 1000	584	1,056	19	26	31	36	40	43	46
HE 1000	494	1,036		21	27	31	35	38	41
HE 1000	438	1,026		18	24	28	32	36	39
HE 1000	415	1,02	35	40	44	48	51	54	56
HE 1000	393	1,016	32	37	41	45	48	51	53
HE 1000 M	349	1,008			20	24	28	31	34
HE 1000 B	314	1			18	22	25	29	31
HE 1000 A	272	0,99			15	19	22	26	28
HE 1000	249	0,98				16	19	22	25
HE 1000 AA	222	0,97					16	19	21
HE 900	466	0,938		19	24	29	32	36	39
HE 900	391	0,922		16	21	25	29	32	35
HE 900 M	333	0,91			18	22	26	29	31
HE 900 B	291	0,9			16	20	23	26	29
HE 900 A	252	0,89				17	20	23	25
HE 900 AA	198	0,87						16	19
HE 800	444	0,842		17	22	26	30	33	36
HE 800	373	0,826			19	23	26	29	32
HE 800 M	317	0,814			16	20	23	26	29
HE 800 B	262	0,8				17	20	23	25
HE 800 A	224	0,79					17	20	22
HE 800 AA	172	0,77							15
HE 700	418	0,744		15	20	24	27	30	33
HE 700	352	0,728			17	21	24	27	29
HE 700 M	301	0,716				18	21	24	26
HE 700 B	241	0,7					17	20	22
HE 700 A	204	0,69					15	17	19

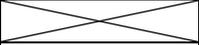
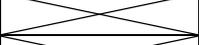
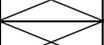
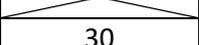
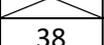
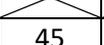
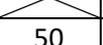
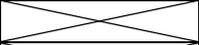
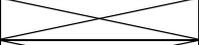
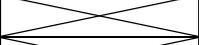
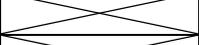
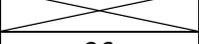
Tableau 19 : Portée maximale (m) pouvant être atteinte - Poutres caissons HE - Ouvrage à 3 travées

Poutres caissons fabriquées à partir de poutrelles européennes à très larges ailes

			Nombre de caissons						
Type de profilés		Hauteur du profilé (m)	2	3	4	5	6	7	8
HL 1100	607	1,138	20	28	34	39	44	48	51
HL 1100	548	1,128	18	26	32	37	41	45	48
HL 1100 R	499	1,118	15	24	29	34	39	42	45
HL 1100 M	433	1,108		21	27	32	36	39	42
HL 1100 B	390	1,1		19	24	29	33	37	40
HL 1100 A	343	1,09		16	21	26	30	33	36
HL 1000	976	1,108	30	38	45	50	55	59	62
HL 1000	883	1,092	28	36	42	48	52	56	59
HL 1000	748	1,068	24	32	38	43	48	52	55
HL 1000	642	1,048	20	28	34	39	43	47	50
HL 1000	591	1,04	18	27	32	37	42	45	49
HL 1000	554	1,032	17	25	31	36	40	43	47
HL 1000	539	1,03	16	25	30	35	39	43	46
HL 1000	483	1,02		22	28	33	37	40	43
HL 1000	443	1,012		20	26	30	34	38	41
HL 1000 M	412	1,008		19	25	29	33	37	40
HL 1000 B	371	1		17	23	27	31	35	38
HL 1000 A	321	0,99		15	20	24	28	31	34
HL 1000 AA	296	0,982			17	21	25	28	31
HL 920	1377	1,093	36	44	50	56	60	63	66
HL 920	1269	1,093	36	44	51	56	61	65	68
HL 920	1194	1,081	34	43	49	55	59	63	67
HL 920	1077	1,061	32	40	47	52	56	60	64
HL 920	970	1,043	29	38	44	49	54	58	61
HL 920	787	1,011	24	33	39	44	48	52	55
HL 920	725	0,999	23	31	37	42	46	50	53
HL 920	656	0,987	21	28	34	39	43	47	50
HL 920	588	0,975	18	26	32	37	41	44	48
HL 920	537	0,965	16	24	30	34	38	42	45
HL 920	491	0,957		22	28	32	36	40	43
HL 920	449	0,948		20	26	30	34	38	41
HL 920	420	0,943		19	24	29	33	36	39
HL 920	390	0,936		17	23	27	31	34	37
HL 920	368	0,931		16	21	25	29	32	35
HL 920	344	0,927		15	20	24	28	31	34

Tableau 20 : Portée maximale (m) pouvant être atteinte - Poutres caissons HL - Ouvrage à 3 travées

Poutres caissons fabriquées à partir de profils britanniques « UB »

Type de profilés		Hauteur du profilé (m)	Nombre de caissons						
			2	3	4	5	6	7	8
UB 1100	607	1,138	20	28	34	39	44	48	51
UB 1100	548	1,128	18	26	32	37	41	45	49
UB 1100	499	1,118	15	24	30	34	39	42	46
UB 1100	433	1,108		21	27	32	36	39	43
UB 1100	390	1,1		19	25	29	33	37	40
UB 1100	343	1,09		16	21	26	30	33	36
UB 1016	584	1,056	16	24	30	35	39	42	45
UB 1016	494	1,036		21	26	31	35	38	41
UB 1016	438	1,026		18	24	28	32	36	39
UB 1016	415	1,02		17	23	27	31	34	37
UB 1016	393	1,016		16	22	26	30	33	36
UB 1016	350	1,008			20	24	28	31	34
UB 1016	314	1			18	22	25	29	31
UB 1016	272	0,99			15	19	22	26	28
UB 1016	249	0,98				16	19	22	25
UB 1016	222	0,97					16	19	21
UB 1000	976	1,108	30	38	45	50	55	59	62
UB 1000	883	1,092	28	36	42	48	52	56	59
UB 1000	748	1,068	24	32	38	43	48	52	55
UB 1000	642	1,048	20	28	34	39	43	47	50
UB 1000	591	1,04	18	27	32	37	42	45	49
UB 1000	554	1,032	17	25	31	36	40	43	47
UB 1000	539	1,03	16	25	30	35	39	43	46
UB 1000	483	1,02		22	28	33	37	40	43
UB 1000	443	1,012		20	26	30	34	38	41
UB 1000	412	1,008		19	25	29	33	37	40
UB 1000	371	1		17	23	27	31	35	38
UB 1000	321	0,99		15	20	24	28	31	34
UB 1000	296	0,982			17	21	25	28	31
UB 920	1377	1,093	36	44	50	56	60	63	66
UB 920	1269	1,093	36	44	51	56	61	65	68
UB 920	1194	1,081	34	43	49	55	59	63	67
UB 920	1077	1,061	32	40	47	52	56	60	64
UB 920	970	1,043	29	38	44	49	54	58	61
UB 920	787	1,011	24	33	39	44	48	52	55
UB 920	725	0,999	23	31	37	42	46	50	53
UB 920	656	0,987	21	28	34	39	43	47	50
UB 920	588	0,975	18	26	32	37	41	44	48
UB 920	537	0,965	16	24	30	34	38	42	45
UB 920	491	0,957		22	28	32	36	40	43

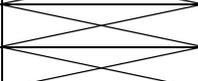
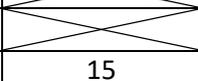
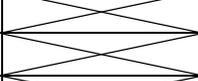
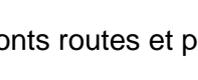
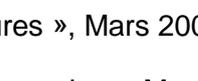
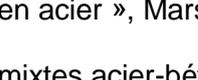
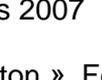
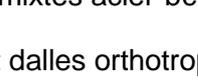
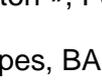
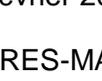
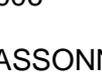
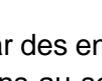
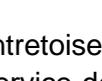
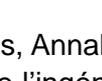
UB 920	449	0,948		20	26	30	34	38	41
UB 920	420	0,943		19	24	29	33	36	39
UB 920	390	0,936		17	23	27	31	34	37
UB 920	368	0,931		16	21	25	29	32	35
UB 920	344	0,927		15	20	24	28	31	34
UB 914	576	0,993	15	24	29	34	38	41	44
UB 914	521	0,981		21	27	31	35	39	42
UB 914	474	0,971		20	25	29	33	37	40
UB 914	425	0,961		18	23	27	31	34	37
UB 914	381	0,951		15	21	25	28	32	34
UB 914	345	0,943			19	23	26	30	32
UB 914	313	0,932			16	20	24	27	29
UB 914	289	0,9266			15	19	22	25	28
UB 914	271	0,923				18	21	24	26
UB 914	253	0,9184				16	20	22	25
UB 914	238	0,915				15	18	21	23
UB 914	224	0,9104					17	20	22
UB 914	201	0,903						17	19

Tableau 21 : Portée maximale (m) pouvant être atteinte - Poutres caissons UB - Ouvrage à 3 travées

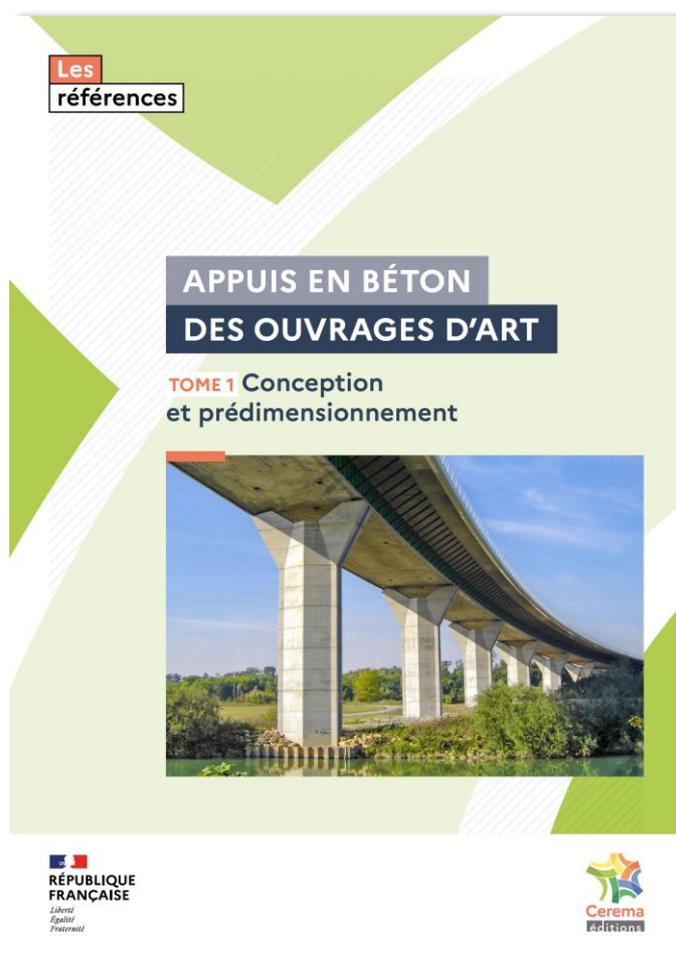
### III. Références bibliographiques

- [1] Eurocodes 0 et 1, Application aux ponts routes et passerelles, SETRA, Février 2010
- [2] Eurocode 1 « Actions sur les structures », Mars 2004
- [3] Eurocode 3 « Calcul des structures en acier », Mars 2007
- [4] Eurocode 4 « Calcul des structures mixtes acier-béton », Février 2006
- [5] Le calcul des grillages de poutres et dalles orthotropes, BARES-MASSONNET, 1966
- [6] Calcul des ponts à poutres multiples solidarisiées par des entretoises, Annale des Ponts et Chaussées, Mémoires et documents relatifs à l'art des constructions au service de l'ingénieur, Jean COURBON, vol 17, 1940
- [7] Ponts mixtes acier-béton, Guide de conception durable, SETRA, Septembre 2010
- [8] Guide méthodologique, Eurocode 3 et 4, Application aux ponts routes mixtes acier-béton, SETRA, Juillet 2007
- [9] Profilés et Aciers Marchands, ArcelorMittal
- [10] Bulletin Ouvrages d'Art n°66, « Le nouveau guide de conception des ponts mixtes acier-béton. Seconde partie : Dimensionnement des bipoutres aux eurocodes », Daniel LE FAUCHEUR, Mars 2011

# Les dernières publications OA du Cerema

## Appuis en béton des ouvrages d'art

*Tome 1 : Conception et prédimensionnement*



Il y a 50 ans le SETRA publiait le dossier Piles et Palées 73, dit PP73, dossier volumineux détaillant les règles de l'art relatives à la conception des appuis de pont. Ce document couvrait l'ensemble des champs concernés par les appuis de pont : implantation générale des appuis, typologie, aspect architectural, conditions de coffrage, ferrailage-type, calcul automatique, équipements des appuis etc.

Cinq décennies plus tard, l'entrée en vigueur des Eurocodes a modifié les règles de conception et de justification des structures en béton. Au-delà de ces règles techniques, c'est l'ensemble de l'environnement normatif qui a évolué (appareils d'appui, dispositifs de retenue, loi sur l'eau) ainsi que les pratiques de conception ou encore la manière de conduire un projet (intervention quasi-systématique d'un architecte, intégration de nouveaux enjeux), sans oublier l'évolution des matériaux utilisés.

Le guide des appuis en béton des ouvrages d'art comprendra deux tomes : le premier, sorti en juin 2023, accompagne le projeteur dans sa démarche de conception, fournit des recommandations visant à améliorer la durabilité de l'ouvrage et propose des prédimensionnements des épaisseurs de béton pour les appuis les plus courants. Le second tome, à paraître, sera axé sur les justifications structurales et la détermination pratique du ferrailage.

# Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art

## Fascicule 5 – Conduite d'une intervention sur un ouvrage existant



Le présent ouvrage est l'un des fascicules techniques constituant le corpus technique de la nouvelle Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEOA).

Les maîtres d'ouvrage chargés de veiller sur les ouvrages d'art sont confrontés à un patrimoine vieillissant, à une évolution du trafic routier de plus en plus agressive pour les structures, à des contraintes d'exploitation majeures et à l'augmentation des dépenses de maintenance. Les processus qui permettent de conduire une opération de réparation ou de réhabilitation d'ouvrage d'art, depuis les premières expertises, jusqu'à la mise au point du projet sont longs et complexes. Les maîtres d'ouvrages et leurs assistants ont besoin de bien appréhender les étapes à suivre pour assumer leurs responsabilités et piloter l'élaboration d'un projet d'intervention. Ce guide a été conçu en ce but. Il place le maître d'ouvrage au centre des décisions. Il s'adresse aussi à tous les acteurs du diagnostic et de la réparation d'ouvrages d'art afin de faciliter la maîtrise des interfaces techniques ou administratives avec le maître d'ouvrage.

**Toutes les publications présentées sont disponibles sur la plateforme  
documentaire du CEREMA : <https://doc.cerema.fr/>**

# Bulletin Ouvrages d'Art du Cerema

<https://www.cerema.fr/fr/activites/infrastructures-transport>

## Le Cerema, l'expertise publique pour le développement et la cohésion des territoires

Le Cerema est un établissement public qui apporte un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre de ressources et d'expertise, il a pour vocation de produire et de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au cœur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, services de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

**Mise en page** › Cerema ITM - DTOA

**Crédits photos de la couverture** › Pierre Marchand

**Crédits photos** › Cerema, Université Gustave Eiffel, Pierre Marchand

**ISBN** > 978-2-37180-618-4

**Pour toute correspondance** › [Redaction-BOA.DTOA.DTeclTM.cerema@cerema.fr](mailto:Redaction-BOA.DTOA.DTeclTM.cerema@cerema.fr)

**www.cerema.fr** › Rubrique « Nos éditions »

Aménagement et cohésion des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement - [www.cerema.fr](http://www.cerema.fr)

Infrastructures de transport et matériaux - 110 rue de Paris - 77171 Sourdun - Tél. +33 (0)1 60 52 31 31

Siège social : Cité des mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél. +33 (0)4 72 14 30 30