

---

# Contribution à l'étude des grillages de poutres

Auteur : Pierre PERRIN - Adjoint au chef du Service Ouvrages d'Art - Dir Est

Date : mercredi 29 avril 2020

---

<b>1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Modélisation.....</b>	<b>3</b>
2.1	Modélisations en grillage de poutres classique .....	3
2.1.1	Types de structures d'ouvrage d'art modélisables par un grillage de poutre .....	3
2.1.2	Exemples de grills classiques.....	4
2.2	Modélisations éléments finis, plaques et volumiques .....	8
2.2.1	Modélisation poutres et plaques .....	8
2.2.2	Modélisation volumique .....	10
2.3	Méthodes analytiques de calcul de la répartition transversale.....	12
2.4	Critères de choix d'un modèle ou d'une méthode de calcul .....	13
2.4.1	Spécificités géométriques de l'ouvrage .....	13
2.4.2	Application des charges .....	13
2.4.3	Justification globale ou locale .....	14
2.4.4	Post traitements .....	14
<b>3</b>	<b>Points particuliers et exemples .....</b>	<b>15</b>
3.1	Répartition transversale des moments.....	15
3.2	Répartition transversale de l'effort tranchant.....	18
<b>4</b>	<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>19</b>

## 1 INTRODUCTION

La modélisation des structures par des grillages de poutres est fréquemment utilisée dans le domaine des ouvrages d'art. Cette technique consiste à établir des systèmes de 2 ou plusieurs familles de poutres le plus souvent parallèles, assemblées aux nœuds et pouvant faire entre elles des angles divers. Elle présente l'avantage de se décliner à de nombreuses typologies d'ouvrages, et permet avec un simple logiciel de calcul à barres d'effectuer la modélisation globale d'un ouvrage, tout en conservant la possibilité d'un raffinement local. L'exploitation des résultats est également avantageuse dans la mesure où l'on récupère directement les efforts dans les barres. En contrepartie, la mise en œuvre d'un grillage de poutres peut, suivant le type d'ouvrage et le chargement à étudier, devenir fastidieuse. En effet, la multiplicité des éléments de poutre à définir, les précautions à prendre dans la définition des caractéristiques mécaniques, ou encore la nécessité de discrétiser les charges appliquées peuvent allonger considérablement les délais de réalisation du modèle. De plus, si ces travaux ne sont pas effectués avec suffisamment de précautions et de vérifications, la précision des résultats obtenus peut être affectée.

Les modélisations en grillage de poutre sont concurrencées par d'autres méthodes ou outils qui permettent d'évaluer le comportement mécanique des structures. On trouve ainsi dans la littérature différentes méthodes analytiques ou abaquées de calcul de la répartition transversale. Par ailleurs l'apparition de logiciels de calcul aux éléments finis performants, avec des possibilités de modélisation en éléments de poutre, mais également en éléments de plaque ou volumiques, offrent de multiples alternatives à la modélisation classique en grillages de poutres.

Le présent chapitre détaille au travers d'exemples les différentes structures modélisables, ainsi que la multiplicité des modélisations aux éléments finis envisageables, pour une structure donnée, en alternative à une modélisation de type grillage de poutres classique. On s'intéresse en particulier à la problématique des ouvrages de type pont à poutres sous chaussée, comportant ou non des entretoises intermédiaires, et présentant éventuellement un biais. Les exemples étudiés visent à présenter les avantages et inconvénients dans l'élaboration ou l'exploitation des résultats de chaque type de modèle.

## 2 MODELISATION

### 2.1 Modélisations en grillage de poutres classique

#### 2.1.1 Types de structures d'ouvrage d'art modélisables par un grillage de poutre

De façon classique, le principe d'un grillage de poutres consiste à modéliser une structure dans les 2 dimensions de l'espace, la structure pouvant recevoir notamment des charges perpendiculairement à son plan. Par extension, un grillage de poutre peut aussi être réalisé dans les 3 dimensions de l'espace pour tenir compte d'excentrement entre les éléments.

Un grillage de poutre est généralement utilisé pour modéliser des ouvrages ou parties d'ouvrages ayant un comportement assimilable à celui d'une dalle, avec éventuellement une direction privilégiée (orthotropie, comme c'est le cas pour les ponts à poutres sous chaussée).

Les structures concernées sont nombreuses, et l'on peut citer de façon non exhaustive :

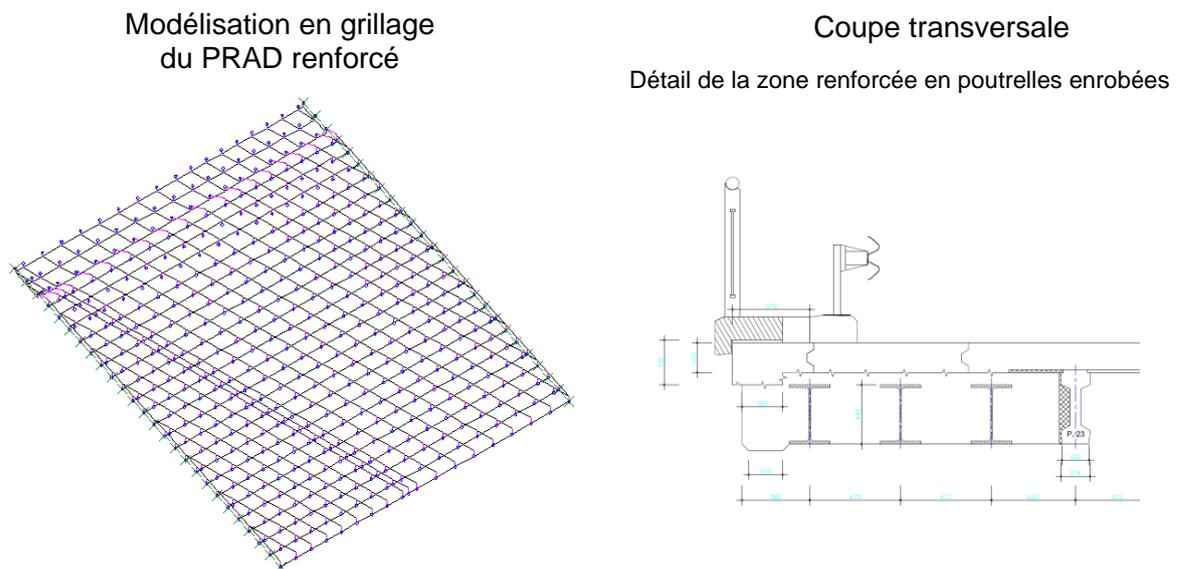
- les ponts dalles, en béton armé (PSIDA) ou en béton précontraint (PSIDP), éventuellement d'inertie variable longitudinalement, et comportant ou non des encorbellements
- les ponts à dalle nervurée (PSIDN), à nervures larges ou étroites
- les ponts à poutres sous chaussée, avec poutres en béton armé (PSIBA), ou poutres en béton précontraint, par post-tension (VIPP) ou par prétension (PRAD). Ces ouvrages peuvent éventuellement comporter des entretoises sur appuis ou intermédiaires (les entretoises intermédiaires étant exclues pour les PRAD).
- les ponts à poutrelles enrobées (PPE) et éventuellement ajourées et précontraintes transversalement (PSI-PAP)
- les ponts à dalle élégiée ou avec évidements
- etc, ...

Les structures peuvent comporter plusieurs travées et présenter éventuellement un biais.

## 2.1.2 Exemples de grills classiques

Nous donnons ici quelques exemples pour illustrer la diversité des ouvrages modélisables via des grillages de poutres classiques. Nous attirons l'attention sur le fait que ce type de modèle nécessite d'être vigilant quant aux caractéristiques à affecter aux barres afin notamment d'éviter les redondances de rigidité en flexion et en torsion (se reporter sur ce sujet aux recommandations du guide PRP 75 du SETRA [2]).

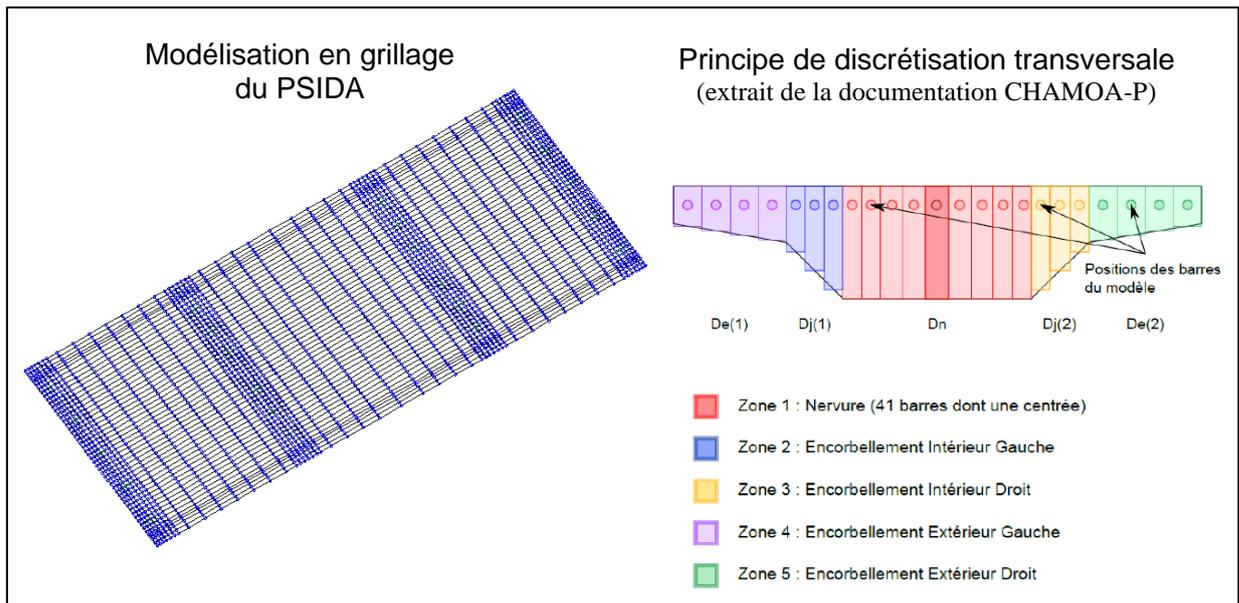
La *Figure 1* ci-dessous présente un grillage de poutre réalisé avec le logiciel ST1 pour le recalcul d'un ouvrage de type PRAD. Cet ouvrage a fait l'objet d'un renforcement en rive par une structure en poutrelles enrobées qui apparaît dans le modèle avec un excentrement négatif. L'ouvrage présente un biais de 80 grades, une largeur de 16,20m et comporte 2 travées isostatiques de 11,36m chacune.



**Figure 1 – Modélisation en grillage de poutres d'un PRAD renforcé par une structure accolée**

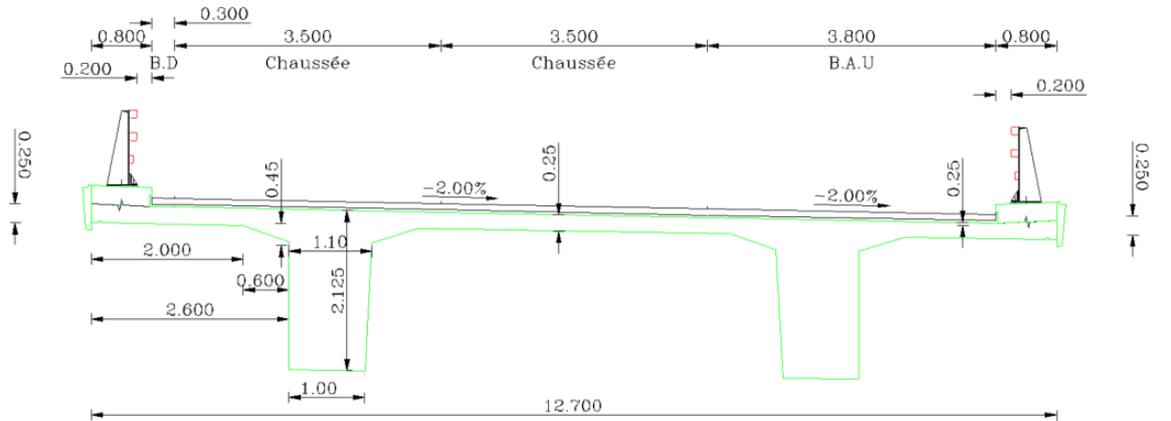
La modélisation est basée sur des nœuds définis au centre de gravité du hourdis. Transversalement, le hourdis est représenté par des barres reliant ces nœuds. Longitudinalement, des barres représentant chaque poutre et son hourdis associé sont définies en s'appuyant sur les mêmes nœuds par l'intermédiaire d'excentremens rigides : on tient donc compte de la distance effective entre les centres de gravité des éléments. L'excentrement spécifique de la zone renforcée en poutrelles enrobées est pris en compte avec le même principe.

La *Figure 2* ci-dessous présente un grillage de poutre généré par le logiciel de calcul de ponts types CHAMOA-P du Cerema. Ce modèle est établi spécifiquement pour le calcul des efforts dans les chevêtres incorporés d'un pont dalle type PSIDA ou PSIDP. L'ouvrage comporte ici 3 travées de portées 11,5m – 15m – 11,5m pour une largeur de 17,50m et présente un biais de 76 grades. Le modèle permet de reproduire le comportement en 3 dimensions de l'ouvrage en particulier au droit des lignes d'appui pour dimensionner le ferrailage de ces zones. Il tient compte du positionnement et de l'élasticité de chaque appareil d'appui et comporte une discrétisation raffinée sur appuis pour permettre l'évaluation précise des moments locaux longitudinaux et transversaux.

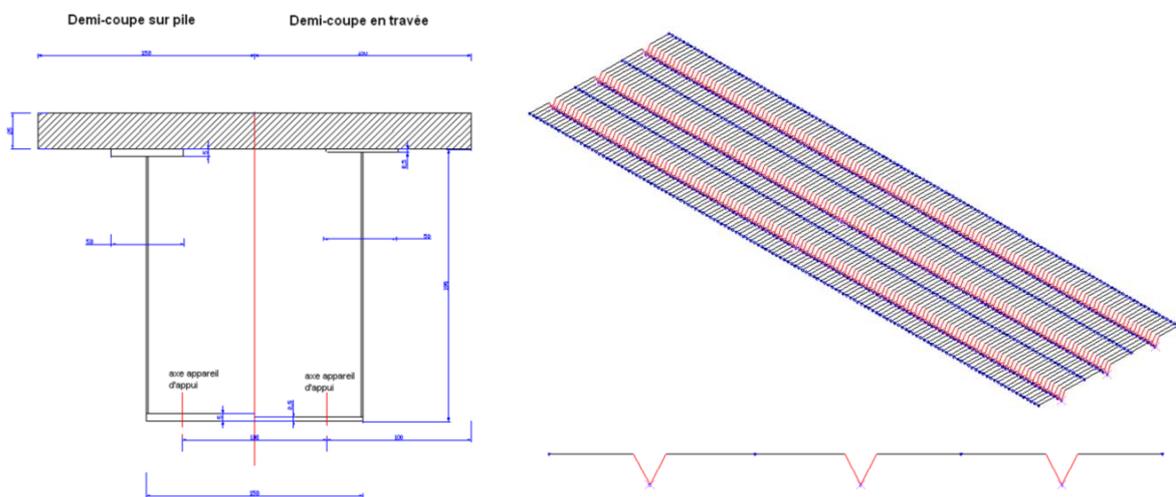


**Figure 2 – Modélisation en grillage de poutres d'un PSIDA**

La *Figure 3* présente un projet d'élargissement d'un pont à nervures en béton précontraint par une structure de type caisson mixte. L'ouvrage initial possède 2 travées continues de portées respectives 33,40m et 36,30m, pour une largeur totale de 12,70m. Les 2 nervures, le caisson d'élargissement et leur hourdis associé sont représentés par des barres longitudinales excentrées. Les hourdis intermédiaires et en encorbellement sont représentés par des barres longitudinales et transversales.



Coupe transversale du tablier existant



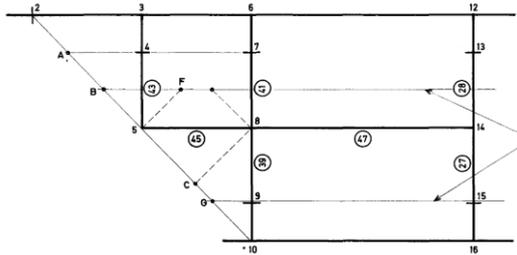
Coupe transversale du caisson mixte d'élargissement

Modélisation grill de poutre du tablier élargi  
- vue générale et vue transversale -

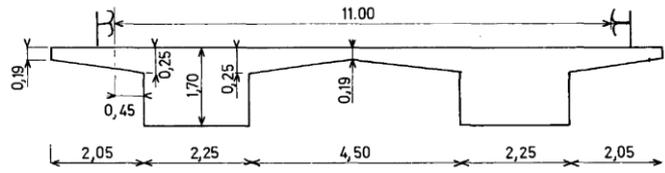
**Figure 3 – Modélisation en grillage de poutres pour l'élargissement d'un pont à 2 nervures précontrainte par liaisonnement avec une structure de type caisson mixte**

Les exemples des *Figure 4* et *Figure 5* ci-après sont tirés du guide PRP 75 du SETRA [2]. La *Figure 4* concerne la modélisation en grillage de poutre d'un ouvrage à 2 nervures larges de portée 39,50m, constitué d'une travée isostatique avec un biais de 51 grades.

Modélisation en grillage du PSIDN



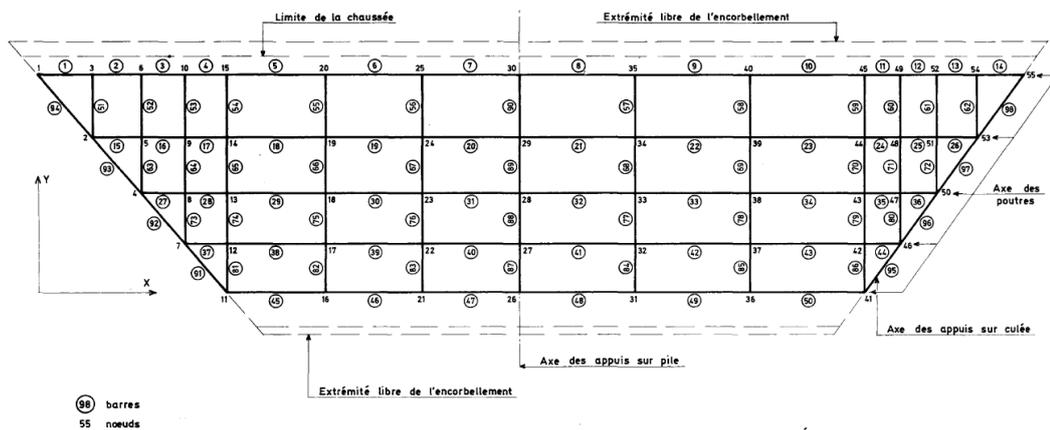
Coupe transversale



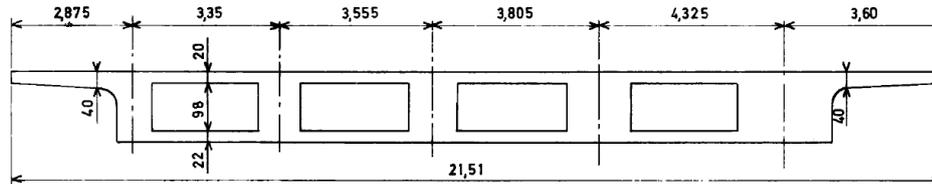
**Figure 4 – Modélisation en grillage de poutres d'un PSIDN**

La *Figure 5* présente une dalle avec évidements dont la morphologie se rapproche de celle d'un pont caisson multi-cellulaire. La disposition des appuis conduit à une géométrie atypique en trapèze qui nécessite un épaississement des âmes du côté des fortes portées.

Modélisation en grillage



Coupe transversale



**Figure 5 – Modélisation en grillage de poutres d'une dalle avec évidements**

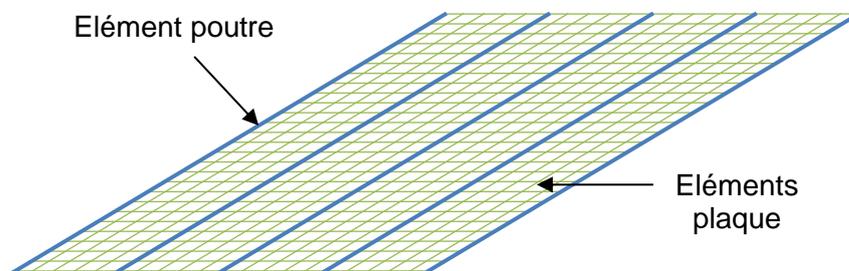
Les exemples présentés illustrent la polyvalence des modélisations en grillage de poutres. Ces modèles présentent toutefois des difficultés. D'une part la discrétisation en éléments de poutre peut se révéler fastidieuse à mettre en œuvre et complexifier l'application des charges mobiles sur la structure, d'autre part la récupération des résultats en effort ou en contraintes peut nécessiter une recomposition en vue des justifications.

En fonction du cas étudié et des outils dont on dispose il peut ainsi être pertinent d'avoir recours à un modèle comportant des éléments de plaques ou de coque pour représenter les dalles ou les portions de hourdis des tabliers.

## 2.2 Modélisations éléments finis, plaques et volumiques

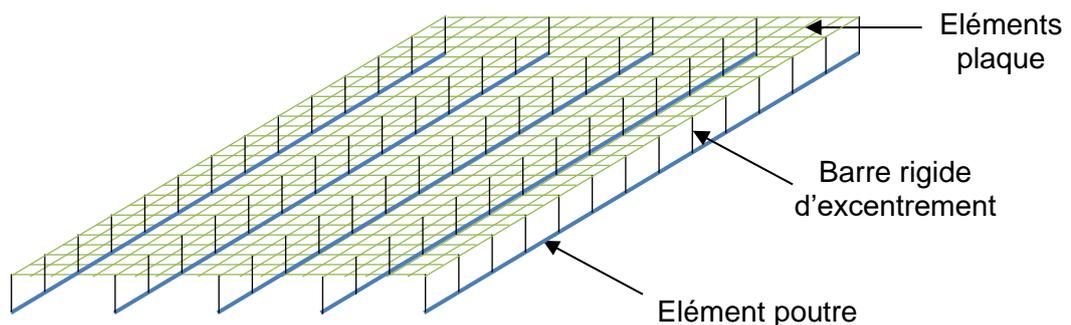
### 2.2.1 Modélisation poutres et plaques

Les éléments finis de type plaque (ou coque) permettent de représenter soit directement la dalle, soit uniquement la partie hourdis d'un pont à poutres. Le recours aux plaques et coques présente un double avantage : d'une part la mise en œuvre du modèle et des chargements est facilitée, et d'autre part la représentation du comportement de l'ouvrage est plus fidèle à la réalité (effet de plaque). La constitution du maillage des éléments de plaque est gérée par l'algorithme du logiciel, ce qui simplifie la construction par rapport à un modèle grill de poutres. La géométrie du maillage peut être effectuée dans un plan unique en définissant au besoin, et si le logiciel le permet, un excentrement des plaques ou des poutres par rapport au maillage. Cet excentrement n'apparaît pas dans le maillage mais simplement en tant que caractéristique des éléments : il est donc conseillé de vérifier la prise en compte effective des excentres par le logiciel. Cette vérification peut être effectuée a minima en comparant la flèche moyenne calculée avec le modèle éléments finis sous un chargement uniforme et celle calculée avec le modèle poutre affecté des caractéristiques de la largeur totale du tablier.



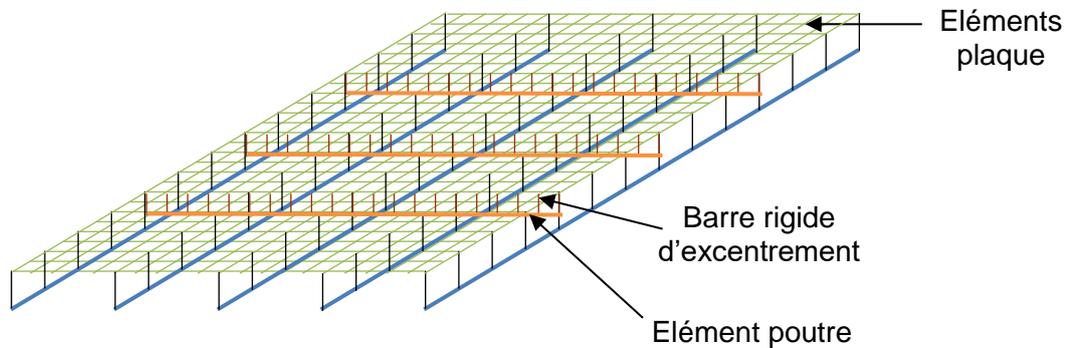
**Figure 6 – Modélisation poutres et plaques, géométrie plane**

Si le logiciel utilisé n'offre pas la possibilité d'excentrer les plaques ou les poutres, il est nécessaire de construire un maillage avec des excentres rigides (modélisation de type poutre-échelle). La réalisation du modèle est alors plus complexe mais on conserve les facilités apportées par les plaques.



**Figure 7 – Modélisation poutres et plaques, géométrie avec barres rigides d'excentrement**

La présence d'entretoises intermédiaires peut également être prise en compte en ajoutant des éléments de poutres transversaux. L'utilisation, à partir d'une géométrie plane, des excentremets des plaques ou des poutres reste alors possible. La mise en œuvre des entretoises peut aussi être effectuée en intégrant des barres d'excentrement au maillage (*Figure 8*).



**Figure 8 – Modélisation poutres et plaques, géométrie avec barres rigides d'excentrement et entretoises intermédiaires**

A partir de ces grands principes de modélisation il peut être établi plusieurs variantes à adapter en fonction de la morphologie du tablier. Par exemple les barres rigides d'excentrement peuvent également être définies biaisées comme dans l'exemple défini en *Figure 3*.

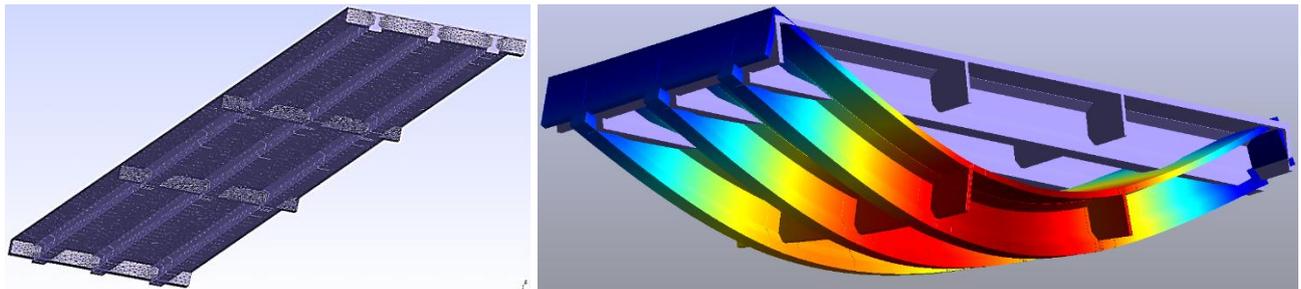
Les conditions d'appui doivent comporter un encastrement en torsion des poutres sur appui. Cette hypothèse est valable quel que soit le modèle utilisé (grill de poutres, ou éléments finis volumique), et se retrouve également dans les hypothèses de base des méthodes analytiques de calcul de la répartition transversale exposées dans la suite.

Pour l'application des efforts sur le modèle, il faut prévoir soit une géométrie avec des groupes de mailles dédiés à l'application des charges, soit un maillage de la dalle suffisamment fin et régulier (quadrangles généralement) pour permettre la description des zones d'impact a posteriori par sélection de mailles.

L'exploitation des résultats est effectuée à partir des efforts issus des différents éléments, qu'il convient de recombinaison entre eux pour la justification des sections composites poutre (ou entretoise) plus hourdis.

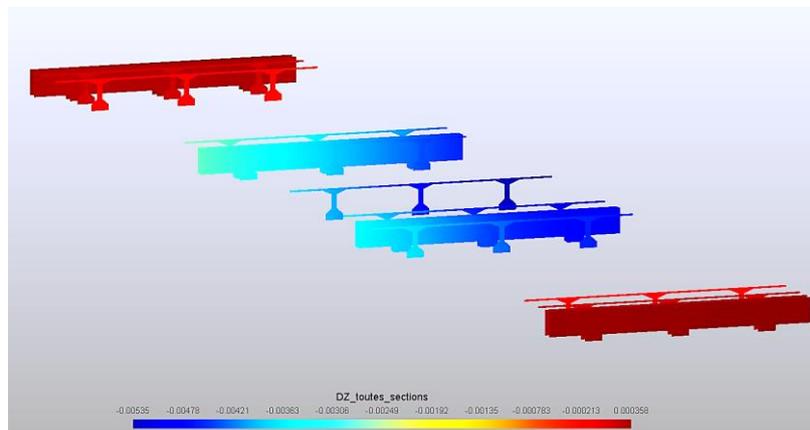
## 2.2.2 Modélisation volumique

La réalisation d'un modèle volumique complet de la structure peut se révéler pertinente dans certains cas, par exemple en vue de vérifications d'efforts locaux, ou lorsque la géométrie présente une configuration particulière difficilement modélisable uniquement par des éléments plaques et poutres. La construction de la géométrie en volumique, si elle apparaît comme complexe de prime abord, peut être effectuée de façon efficace avec les outils de conception 3D actuels qui proposent des fonctions d'extrusion avancées. L'approche 3D est appréciable dans la mesure où elle permet de s'affranchir du calcul des caractéristiques mécaniques des éléments de poutre. De plus, la localisation de la matière est précise, permettant en particulier de définir la portée transversale des hourdis entre nus des poutres et non entre axes, ou encore d'éviter les redondances de matière aux intersections entre éléments que l'on retrouve dans les autres types de modélisation. Enfin, ce type de modèle permet une visualisation graphique directe de la géométrie et des déformées.



**Figure 9 – Modélisation volumique 3D d'un ouvrage de type VIPP entretoisé**

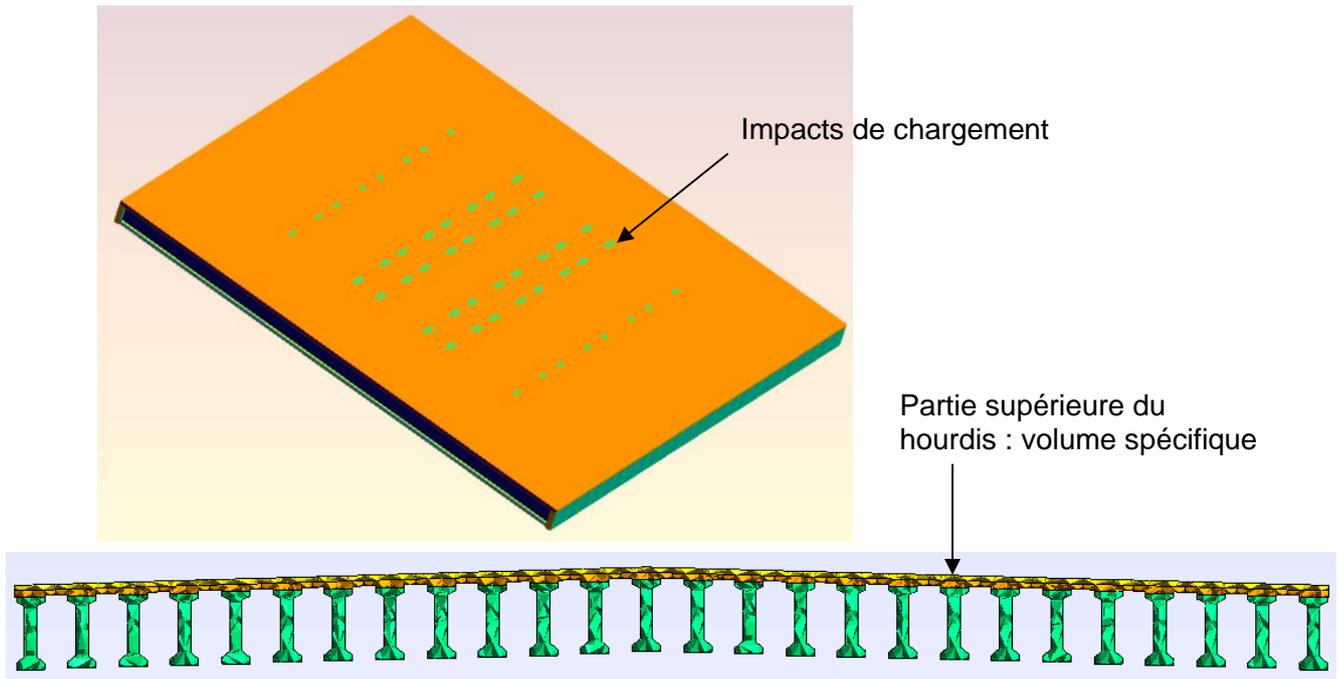
La définition des sections d'étude, en vue des justifications, doit être pensée dès le départ si l'on souhaite obtenir des coupes propres avec des nœuds tous situés dans le plan de la coupe. Dans l'exemple précédent, le modèle étant construit par extrusions successives entre entretoises, des sections d'étude supplémentaires ont été prévues pour faciliter l'exploitation des résultats (*Figure 10*) tout en diminuant le volume des fichiers de sortie.



**Figure 10 – Modélisation volumique 3D : sections d'études**

Le modèle volumique doit lui-aussi comporter un encastrement en torsion des poutres sur appui. Il est possible de créer cet encastrement via des conditions limites, ou en modélisant les volumes d'entretoise sur appui comme en *Figure 9*.

L'application des efforts sur le modèle doit, comme pour les modèles en plaques, être anticipée, et peut également être effectuée de 2 façons différentes. Dans le cas où l'on envisage des groupes de mailles dédiés aux impacts de charge, il est possible de dé-corréler les impacts de chargement des sections d'études intermédiaires (longitudinales ou transversales) en prévoyant une séparation horizontale de la partie supérieure du hourdis, comme présenté en *Figure 11*. Cette disposition permet de gérer de multiples configurations de chargement sans interférer avec les éléments de construction du tablier.



**Figure 11 – Modélisation volumique : définition des impacts de chargement**

Les résultats issus d'un modèle volumique sont donnés en contraintes : en fonction des justifications à mener il est nécessaire d'intégrer ces contraintes pour en déduire le torseur résultant en efforts.

## 2.3 Méthodes analytiques de calcul de la répartition transversale

Indépendamment des méthodes éléments finis, la recherche d'alternatives aux modélisations classiques en grillages de poutres a fait déjà l'objet de nombreux travaux. Dès les années 1920, des méthodes conservatrices établies à partir d'hypothèses simplifiées permettaient de traiter via des abaques les systèmes de grillage les plus simples. Par la suite les 3 principales méthodes analytiques encore utilisées actuellement sont celles de Guyon-Massonet, de Courbon et de Cart-Fauchart. Nous en rappelons ici les principes et les domaines de validité. Des améliorations récentes ont été apportées à ces méthodes, comme par exemple la formulation analytique de Millan qui généralise les méthodes Guyon-Massonet et Cart-Fauchart.

### Méthode de Guyon-Massonet

Une évolution majeure dans les calculs de répartition transversale a été apportée dans les années 1960 par les théories de Guyon, Massonet et Barès qui ont mis au point une méthode de calcul [3] [4] tenant compte de la rigidité en torsion des éléments. Une nouveauté de cette méthode est l'assimilation de la structure à une dalle orthotrope, régie par une équation aux dérivées partielles en flèche de la forme :

$$\rho_P \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + (\gamma_P + \gamma_E) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \cdot \partial y^2} + \rho_E \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = 0 \quad (1)$$

avec :

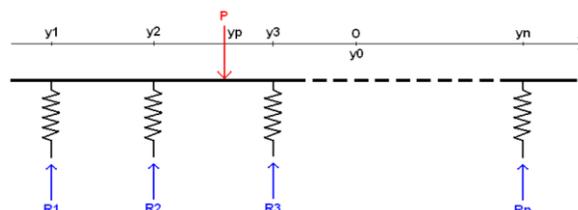
- $\rho_P$  Rigidité de flexion longitudinale par unité de longueur
- $\rho_E$  Rigidité de flexion transversale par unité de longueur
- $\gamma_P$  Rigidité de torsion autour de l'axe longitudinal par unité de longueur
- $\gamma_E$  Rigidité de torsion autour de l'axe transversal par unité de longueur

Cette méthode dite «de Guyon-Massonet » se base sur le calcul des coefficients de répartition transversale qui permettent de simplifier la résolution de l'équation (1) en vue d'obtenir la déformée puis les efforts dans la structure. Elle a été ensuite améliorée et élargie par d'autres auteurs, par exemple pour l'étendre au calcul des structures à poutres de rives différentes des poutres courantes.

Cette méthode est recommandée pour le calcul des tabliers de type pont-dalle ou de type pont à poutres avec un nombre élevé de poutres et comportant ou non des entretoises intermédiaires. Du fait de l'analogie avec une dalle, la méthode est bien adaptée aux tabliers comportant plus de quatre poutres. Pour un ouvrage à 3 ou 4 poutres, il est préférable d'utiliser la méthode de Cart-Fauchart s'il n'y a pas d'entretoises intermédiaires.

### Méthode de Courbon

Le principe de cette méthode a été exposé dans les Annales des Ponts et Chaussées de Novembre-Décembre 1941 [5]. Elle s'applique aux ouvrages comportant des entretoises intermédiaires considérées comme infiniment rigides. En pratique, on l'utilise lorsque la portée de l'ouvrage est de l'ordre du double de sa largeur, et que la hauteur des entretoises est voisine de celle des poutres. La *Figure 12* illustre le principe de la méthode : une section de tablier infiniment rigide transversalement repose sur de ressorts de raideur proportionnelle à la flèche à mi-travée des poutres. Les réactions sur chaque ressort donnent la répartition transversale de la charge appliquée.



**Figure 12 – Principe de la méthode de Courbon**

### Méthode de Cart-Fauchart

Cette méthode a été exposée dans les Annales de l'ITBTP N° 271-272 de Juillet-Aout 1970 [6]. Elle est applicable aux tabliers non entretoisés (hormis sur appuis) et constitués de poutres, de nervures de section constante, ou encore de caissons multiples si la déformation propre des caissons peut être négligée. Le hourdis est assimilé à une série d'entretoises infiniment minces encastrées sur les poutres. La résolution du système d'équations de déformation est effectuée par développement en séries de Fourier.

Cette méthode peut être employée pour les ponts à poutres ou à nervures non entretoisés, ainsi que pour des caissons multiples, si, en première approximation, on admet de négliger la déformation propre des caissons.

### Méthode innovante Millan

Cette méthode s'appuie elle-aussi sur la théorie des dalles orthotropes et a été présentée dans le périodique Construction Métallique n°2 en 2004 [7]. Elle apporte des améliorations à la méthode Guyon-Massonnet : une formulation analytique plus efficace, la possibilité de prendre en compte un coefficient de poisson non nul pour les dalles orthotropes, ou encore d'imposer des conditions de bord sur les éléments de dalle. Cette dernière possibilité permet l'étude de la flexion locale des hourdis par encastrement des bords libres ou encore la modélisation de plusieurs éléments de dalle contiguës. Il est ainsi possible de modéliser finement des ponts à poutres ou à nervures - ce qui constitue une généralisation de la méthode de Cart-Fauchart - sans nécessairement que ces éléments soient tous identiques. Des éléments pratiques concernant l'application de la méthode Millan à la modélisation de ponts à poutres de géométrie quelconque, sont donnés dans l'article [9] issu du Bulletin Ouvrages d'Art n°71.

## **2.4 Critères de choix d'un modèle ou d'une méthode de calcul**

### **2.4.1 Spécificités géométriques de l'ouvrage**

Les méthodes analytiques présentées ci-dessus ne sont valables que si l'on reste dans leur champ d'application. Les critères liés à la rigidité de l'entretoisement ont été rappelés pour chaque méthode et permettent de s'orienter vers celle qui paraît la mieux adaptée à l'ouvrage, sous réserve que celui-ci présente une géométrie relativement régulière. En revanche, si la structure étudiée est plus atypique - avec des dissymétries, des variations d'épaisseur, un fort biais (> 70 grades), des renforcements locaux... - il devient nécessaire de construire un modèle de calcul spécifique de type un grillage de poutres ou modèle éléments finis.

### **2.4.2 Application des charges**

L'application des charges sur le modèle peut s'avérer plus ou moins complexe. En particulier, la discrétisation des chargements sur un grillage de poutres classique est souvent fastidieuse et nécessite des approximations. De ce point de vue, les modélisations aux éléments finis avec des éléments de plaques ou volumiques sont préférables en terme de précision d'implantation des impacts de chargement.

Le choix du modèle pourra aussi être dicté par les facilités de déplacement automatique des charges éventuellement mises à disposition par le logiciel utilisé.

Quel que soit le modèle retenu, il peut être judicieux de passer par la construction des lignes ou surfaces d'influence de l'effet étudié pour n'effectuer qu'une seule fois la résolution de l'équilibre du modèle et en déduire rapidement les efforts obtenus sous un positionnement de charge quelconque.

### **2.4.3 Justification globale ou locale**

Suivant l'élément à justifier, le modèle peut être global ou local. Par exemple, pour étudier le cheminement des efforts locaux dans des assemblages, ou dans des pièces de géométrie spécifique, une modélisation par éléments finis 2D ou 3D est la plus appropriée. En revanche, d'autres effets locaux ne nécessitent pas systématiquement de recourir à des modélisations au éléments finis 2D ou 3D. Par exemple, le calcul des efforts locaux dans les chevêtres incorporés des ponts dalle, tel que présenté en *Figure 2*, est réalisé avec un simple raffinement du modèle en grillage de poutres au droit des appareils d'appui.

### **2.4.4 Post traitements**

En fonction de la nature des justifications à conduire, les résultats issus du modèle nécessitent un post-traitement qui peut être géré soit par le logiciel, soit par un composant externe. Les problématiques les plus fréquentes sont celles des combinaisons ou des enveloppes d'efforts. Cette fonctionnalité n'est pas à négliger pour les études comportant de multiples cas de charges.

### 3 POINTS PARTICULIERS ET EXEMPLES

#### 3.1 Répartition transversale des moments

##### Résultats obtenus avec des modélisations diverses

Les divers modèles ou méthodes de calcul présentées ci-avant donnent des résultats voisins, avec toutefois des valeurs généralement sécuritaires pour la méthode Guyon-Massonet. On donne ci-dessous l'exemple d'un ouvrage PRAD à 26 poutres, de portée 25m, de largeur 21m, avec des poutres toutes identiques, soumis au chargement centré d'un convoi exceptionnel réglementaire type E3F1. L'ouvrage est étudié avec plusieurs modélisations différentes : modèle Guyon-Massonet, modèle Millan multi-plaques (dalles contiguës), modèle volumique (*Figure 13*) et modèle plaques et poutres.

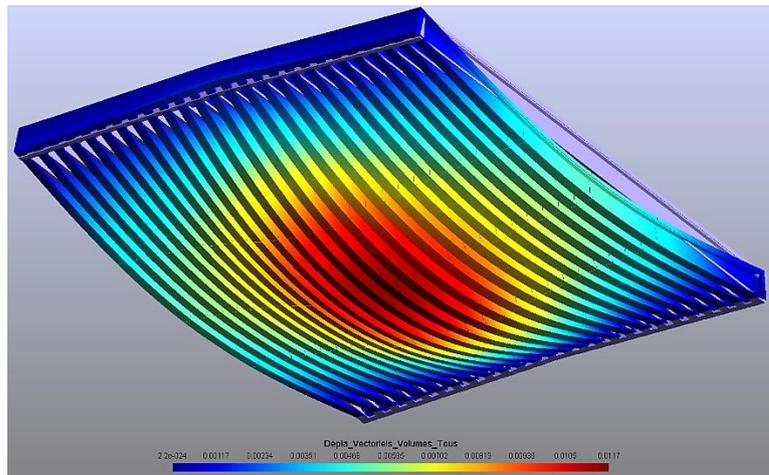


Figure 13 – Modèle volumique : déplacements sous convoi E3F1

Les courbes des coefficients de répartition transversale des moments à mi-travée (*Figure 14*) s'accordent entre tous les modèles, hormis celui issu de la méthode Guyon-Massonet qui reste sécuritaire (majoration de 16% des efforts de flexion dans la poutre la plus sollicitée).

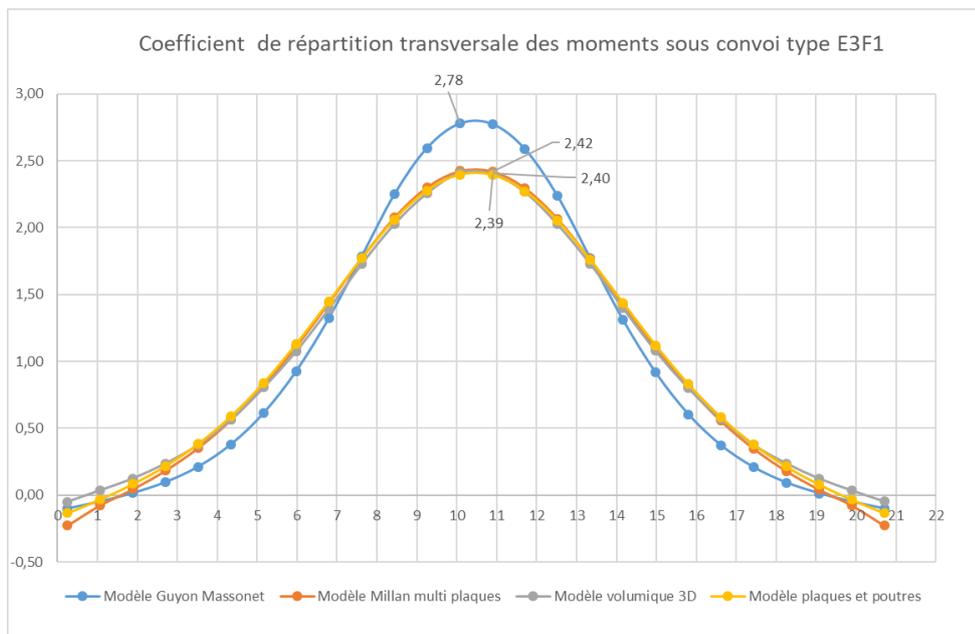
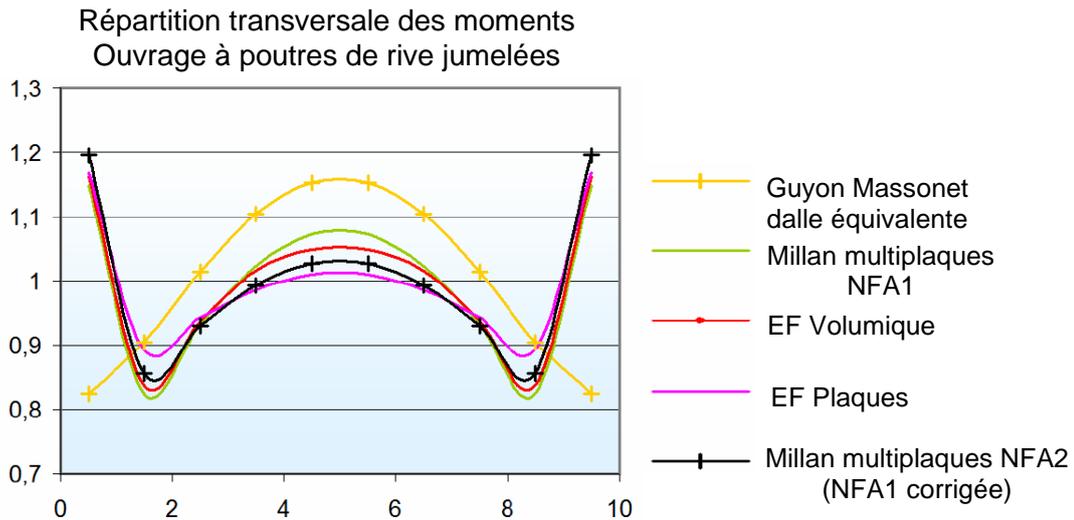


Figure 14 – Comparatif des coefficients de répartition sur les différents modèles



### Cas des ouvrages à poutres de rive renforcées

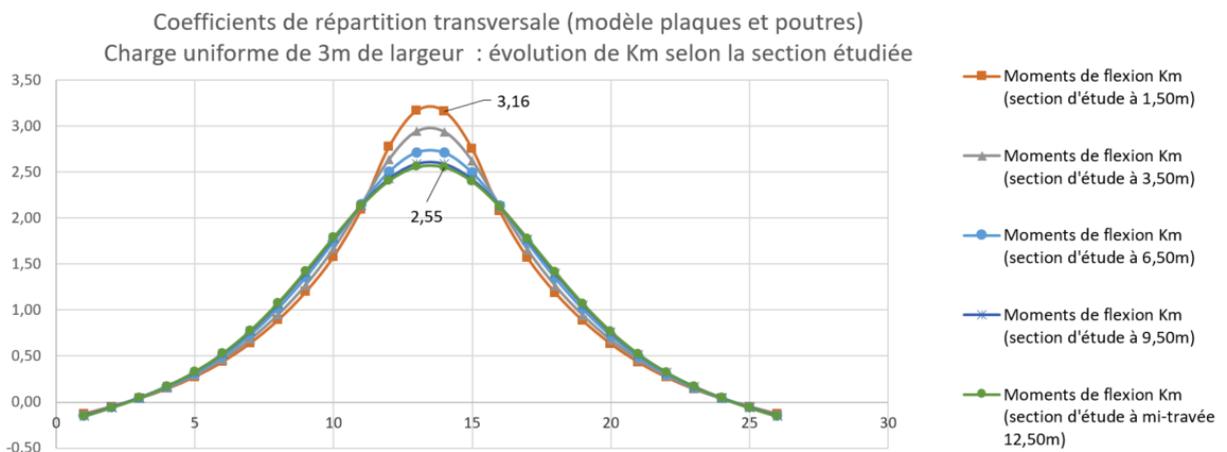
La méthode de Guyon-Massonet, qui consiste à se ramener à une dalle orthotrope équivalente, ne permet pas de traiter directement les surplus d'effort engendrés sur les poutres de rive lorsque celles-ci sont plus massives ou jumelées (disposition couramment adoptée pour faire face à la problématique des chocs de véhicule hors-gabarit). Une adaptation de la méthode à ce cas spécifique a donc été proposée dans la Revue Européenne de Génie Civil [8]. A défaut, si aucune adaptation n'est effectuée, la méthode de Guyon-Massonet devient fautive pour les ouvrages à poutres de rives massives ou jumelées : l'exemple d'un ouvrage à poutres de rive jumelées (Figure 15) montre que les efforts obtenus dans les poutres de rive sont largement sous-estimés et ceux dans les poutres centrales surestimés par rapport aux autres modélisations.



**Figure 15 – Comparatif des coefficients de répartition sur un ouvrage à poutres de rive jumelées (source [9] Bulletin Ouvrages d'Art n°71)**

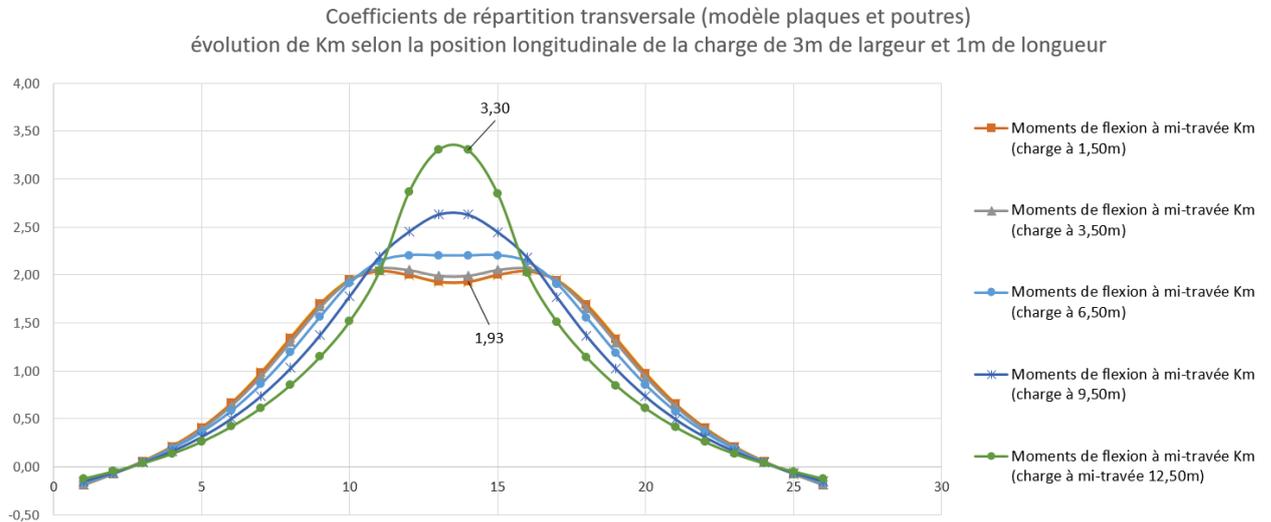
### Evolution de la répartition transversale selon la position de la charge

Quelle que soit la modélisation retenue, il est d'usage de dimensionner les ouvrages en considérant la répartition transversale des moments comme identique tout le long de l'ouvrage, en utilisant de façon sécuritaire les coefficients de répartition obtenus à mi-travée. La figure ci-dessous illustre cette hypothèse sur le cas de l'ouvrage à 26 poutres précédent soumis à une charge surfacique uniforme de 3m de largeur sur toute la longueur du tablier. La répartition transversale des moments sur chaque poutre est donnée à différentes sections d'étude. On constate que les coefficients maximaux diminuent lorsque la section d'étude s'écarte de la mi-travée. Toutefois ces coefficients s'appliquent à des moments plus faibles, ce qui limite le surdimensionnement des sections éloignées de la mi-travée.



**Figure 16 – Coefficients de répartition suivant la section d'étude longitudinale**

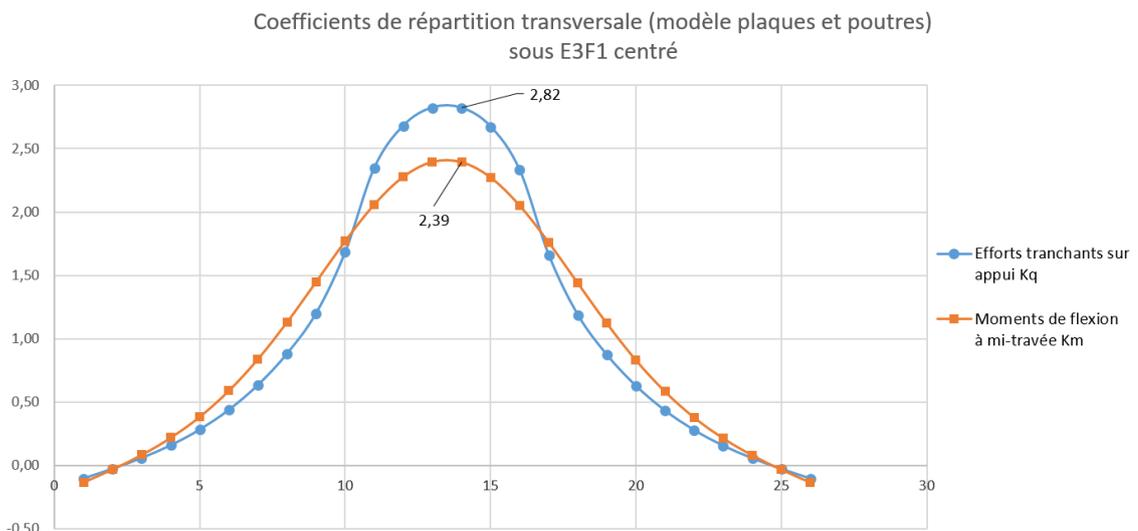
En retenant comme section d'étude la mi-travée pour la répartition des moments, on obtient un coefficient maximal de 2,55 dans la poutre la plus sollicitée à mi-travée. On s'intéresse alors à l'influence de la position de la charge sur cette répartition. La charge de 3m de largeur, précédemment appliquée sur toute la longueur, est réduite à une longueur de 1m puis positionnée à différentes distances à partir de l'appui. La *Figure 17* montre la décroissance des coefficients lorsque l'on s'écarte de la mi-travée.



**Figure 17 – Coefficients de répartition du moment à mi-travée pour différentes positions de charge**

### 3.2 Répartition transversale de l'effort tranchant

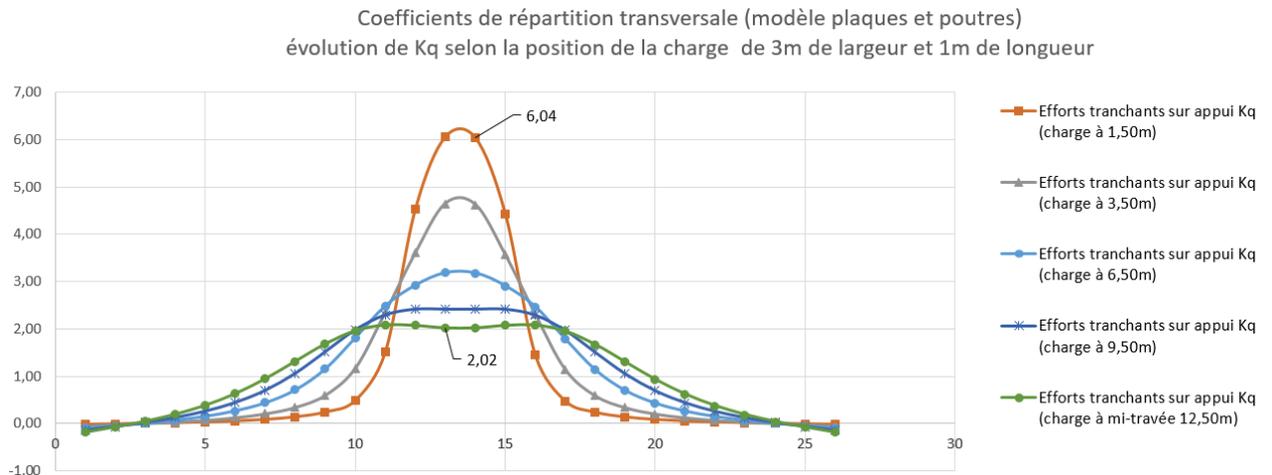
L'étude de la répartition transversale de l'effort tranchant à proximité des appuis est souvent réalisée par simplification à partir des coefficients de répartition transversale des moments à mi-travée. Il faut savoir que cette hypothèse peut conduire à des écarts de l'ordre de 20% avec la répartition réelle de l'effort tranchant. A titre illustratif on donne en *Figure 18* des valeurs des coefficients de répartition transversale sous l'effet d'un convoi E3F1 circulant centré. Pour la poutre la plus sollicitée, le ratio entre les coefficients de répartition de l'effort tranchant sur appui (Kq, courbe bleue) et du moment à mi-travée (Km, courbe orange) vaut 18%.



**Figure 18 – Répartition transversale du moment à mi-travée et de l'effort tranchant sur appui**

La courbe précédente de répartition de l'effort tranchant sur appui est obtenue pour la charge uniforme E3F1 qui s'applique sur toute la longueur de l'ouvrage et sur 5,15m de largeur. En réalité, la répartition transversale dépend du positionnement longitudinal de la charge appliquée, pour une largeur transversale donnée de la charge.

L'étude de l'effet de la position longitudinale de la charge sur la répartition est effectuée en supposant une charge de 3m de largeur et 1m de longueur, positionnée à différentes distances à partir de l'appui (*Figure 19*). On constate qu'à proximité de l'appui les charges ne bénéficient pas de l'effet de répartition : seules les poutres situées immédiatement sous la charge reprennent les efforts. On souligne ainsi le fait que l'ordre de grandeur donné de 20% d'écart entre  $K_q$  et  $K_m$  vaut pour une charge uniformément répartie longitudinalement : si la charge est ponctuelle et selon sa position sur le tablier, les écarts peuvent être bien plus importants.



**Figure 19 – Répartition de l'effort tranchant sur appui pour différentes positions de charge**

Par ailleurs, il est à noter qu'à proximité immédiate de l'appui, les efforts tranchants sont en réalité diminués car les efforts sont transférés directement à l'appui. Cet effet, favorable, ne peut être pris en compte que via un modèle volumique dans lequel une diffusion des efforts (bielle de transmission directe) se met en place dans la matière à proximité de l'appui.

## 4 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] - Guide technique CHAMOA P CHaîne Algorithmique Modulaire Ouvrages d'Art - Annexes [http://www.setra.fr/html/logicielsOA/Ponts\\_Types/CHAMOA-P/chamoa-p.html](http://www.setra.fr/html/logicielsOA/Ponts_Types/CHAMOA-P/chamoa-p.html)
- [2] - Guide pour l'utilisation des programmes de réseaux de poutres - PRP 75 - SETRA -1975
- [3] - Compléments à la méthode de calcul des ponts à poutres multiples - C.Massonnet - Annales de l'ITBTP - janvier 1962.
- [4] - Le calcul des grillages de poutres et dalles orthotropes selon la méthode Guyon-Massonnet-Barès - R.Barès et C.Massonnet - Dunod – 1966
- [5] - Calcul des ponts à poutres multiples solidarisiées par des entretoises – J.Courbon - Annales des ponts et chaussées - Novembre-Décembre 1941
- [6] - Méthode de calcul des ponts nervurés sans entretoise intermédiaire - Annales de l'ITBTP - Juillet-Aout 1970.
- [7] - Nouvelle formulation analytique de la flexion transversale d'une dalle orthotrope - A.L.Millan - Construction Métallique n°2 – 2004
- [8] - Méthode de Guyon Massonnet Barès appliquée aux ouvrages à poutres d'inertie distincte - G.Bondonet et P.Corfdir - Revue Européenne de Génie Civil - Volume 9, n°9-10 – 2005

[9] – Calcul analytique de flexion des ponts à poutres de géométrie quelconque, calage des inerties de torsion transversale par comparaison à des calculs aux éléments finis – P.Perrin et G.Bondonet – Bulletin Ouvrages d’Art - n°71 - 2015