



HAL
open science

Ouvrage-type PICF : développement d'un programme de modélisation paramétré sur un logiciel de modélisation aux éléments finis

Armand Choux

► To cite this version:

Armand Choux. Ouvrage-type PICF : développement d'un programme de modélisation paramétré sur un logiciel de modélisation aux éléments finis. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2024. dumas-04938006

HAL Id: dumas-04938006

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04938006v1>

Submitted on 10 Feb 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright



Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

Année 2023-2024

Voie d'approfondissement : Génie civil

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Jean-Claude Morel
- Maître de TFE : Stéphane Leger
- Expert : Bertrand Cauvin

Par

Armand Choux

Ouvrage-type PICF :

**Développement d'un programme de modélisation
paramétré sur un logiciel de modélisation aux éléments
finis**

Organisme d'accueil :



Notice analytique

AUTEUR			
Nom	Choux		
Prénom	Armand		
ORGANISME D'ACCUEIL			
Nom de l'organisme et Localité	ARCADIS - 18 rue des Granges Galand BP 334 37553 Saint-Avertin Cedex France		
Nom du Tuteur	Stéphane Léger		
ANALYSE DU TFE			
Titre (français)	Ouvrage-type PICF : Développement d'un programme de modélisation paramétré sur un logiciel de modélisation aux éléments finis		
Titre (anglais)	Frame-Bridge: Development of a modeling program configured on finite element modeling (FEM) software		
Résumé (français)	<p>Les ouvrages de type PICF ou cadre sont des ouvrages assez simples et courants pour les ingénieurs ouvrages d'arts. Le calcul de modélisation de la structure est donc très intéressant à automatiser. Les enjeux de la programmation sont à la fois techniques, pratiques et exhaustifs. Technique, car il faut s'assurer de correctement représenter la structure. Pratique car il faut s'assurer que le programme soit suffisamment simple d'utilisation pour pouvoir être facilement utilisé par d'autres ingénieurs. Exhaustif car le programme doit pouvoir couvrir avec justesse un maximum d'ouvrages.</p>		
Résumé (anglais)	<p>Frame type bridges are simple and common structures for structural engineers. The structural modeling calculation is therefore very interesting to automate. The challenges of programming are at the same time technical, practical and exhaustive. Technical, because you must make sure you represent the structure correctly. Practical because you must ensure that the program is simple enough to be easy to use by other engineers. Exhaustive because the program must be able to accurately cover a maximum range of bridges.</p>		
Mots-clés (français, 5 maxi)	PICF, modélisation aux éléments finis, Automatisation, SOFISTIK		
Mots-clés (anglais, 5 maxi)	Frame bridge, finite element modeling (FEM), Automation, SOFISTIK		
Termes géographique (français)	Tours		
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	60	5(10)	13

Déclaration de travail personnel

Je déclare que ce rapport constitue l'aboutissement d'un travail personnel et ne peut être suspecté de plagiat.

Le travail présenté distingue explicitement ce que j'ai produit de ce que j'ai emprunté à d'autres.

A ce titre, les citations sont clairement identifiables et les sources (écrits, images) qui ont alimenté ma réflexion sont référencées.

Remerciements

Je souhaite remercier toutes les personnes m'ayant encadré pour le bon déroulement de ce travail de fin d'études.

Tout d'abord, je tiens à remercier Arcadis pour m'avoir permis de réaliser mon travail de fin d'études dans les meilleures conditions.

Je remercie Monsieur Stéphane LEGER, Responsable de l'équipe Ouvrages et géotechnique de Tours, pour m'avoir fait confiance dans la réalisation de mon stage et pour m'avoir suivi régulièrement sur mon travail de fin d'étude.

Je souhaite remercier Monsieur Régis Boutes, Directeur Technique, pour m'avoir encadré tout au long du stage et pour m'avoir fait part de son expertise.

Je souhaite remercier l'ensemble de l'équipe d'Arcadis de l'agence de Tours pour son accueil chaleureux et sa disponibilité.

Je remercie Mr Bertrand CAUVIN, Responsable d'études Ouvrages d'Art au CEREMA, d'avoir accepté de faire partie de mon jury

Enfin, merci à l'équipe pédagogique de l'ENTPE pour avoir assuré ma formation.

Sommaire

Notice analytique	2
Déclaration de travail personnel.....	3
Remerciements.....	3
Sommaire	4
Liste des illustrations.....	7
Glossaire des acronymes	9
Présentation de l'entreprise.....	10
Objectif du TFE	12
1. Présentation des ponts cadres et des portiques	13
2. Comment modéliser un PICF ?	16
2.1 Matériaux	16
2.2 Géométrie.....	16
2.2.1 Biais de l'ouvrage.....	16
2.2.2 Modélisation des goussets.....	16
2.2.3 Modélisation du sol	17
2.3 Charges	18
2.3.1 Poids propre et Superstructures	18
2.3.2 Remblais sur traverse et coefficient de Marston.....	18
2.3.3 Poussée des remblais techniques	19
2.3.4 Retrait	20
2.3.5 Fluage	21
2.3.6 Température	21
2.3.7 Charges LM1 au sens de l'Eurocode	22
2.3.8 Charges sur remblais	23
2.4 Combinaisons	24
2.4.1 Action permanente	24
2.4.2 Action variable.....	24
2.4.3 Actions thermiques.....	24
2.4.4 Combinaisons d'actions.....	24
3. Fonctionnement du Template SOFISTIK	25
3.1 Fonctionnement général	25
3.2 Paramétrage des variables	26
3.3 Note de calcul.....	26
4. Modélisation 2D – Modèle à poutre	27
4.1 Matériaux	27

4.2	Géométrie	28
4.2.1	Biais de l'ouvrage.....	28
4.2.2	Construction du modèle.....	29
4.2.3	Axe de définition des poutres.....	29
4.2.4	Maillage.....	31
4.3	Charges statiques	31
4.3.1	Poids propre	31
4.3.2	Superstructures.....	31
4.3.3	Poussée des terres – Remblais techniques.....	32
4.4	Charges routières	32
4.4.1	Charges UDL sur traverse.....	32
4.4.2	Charges TS sur traverse	33
4.4.3	Charges mobiles sur remblais	35
4.5	Charges thermiques et retrait infini	36
4.6	Combinaisons	37
4.7	Ferraillage	38
5.	Modélisation 3D – Modèle à coque.....	39
5.1	Géométrie.....	39
5.1.1	Construction du modèle.....	39
5.1.2	Axe de définition des plaques	39
5.1.3	Maillage.....	39
5.2	Charges statiques	40
5.3	Charges routières sur traverse.....	40
5.3.1	Etude des 4 cas de configuration de la chaussée	40
5.3.2	Permutation des voies.....	40
5.3.3	Nécessité de créer une logique de dénomination des cas	41
5.3.4	Charges UDL sur traverse.....	41
5.3.5	Définition des convois TS.....	42
5.3.1	Chargement TS sur traverse	43
5.3.2	Construction de l'algorithme.....	44
5.4	Charges routières sur remblais.....	46
5.5	Combinaisons	47
5.5.1	Combinaisons intermédiaires	47
5.5.2	Combinaison finale.....	47
6.	Comparaison, validation et interprétation des résultats.....	48
6.1	Comparaison modèle 2D avec une note de calcul.....	48
6.2	Comparaison entre les modèles 2D et 3D.....	48
6.3	Etude du biais prononcé	50
7.	Expérience acquise avec un autre projet et regard critique sur le travail réalisé.....	52

7.1	Flambement non-linéaire d'une pile en béton armé.	52
7.2	Note de modélisation dynamique.....	52
7.3	Praticité pour l'utilisateur	53
7.4	Affordance.....	54
7.5	Vérification préliminaire de la modélisation	54
8.	Pistes d'amélioration du modèle.....	55
8.1	Interface graphique	55
8.2	Module Sismique	55
8.3	Ferraillage	55
8.4	Ouvrages préfabriqués par morceau.....	56
8.5	Méthode de Guyon Massonnet en 2D	56
8.6	Validation du modèle en interne	57
9.	Conclusions.....	58
9.1	Conclusion sur les modèles	58
9.2	Conclusion personnelle	58
	Annexe 1 : Comparaison des modèles de définition de l'axe des poutres	61
	Annexe 2 : Note de modélisation : PICF	62
	Annexe 3 : Listes des paramètres du modèle	64
	Annexe 4 : Définition des convois	67
	Annexe 5 : Note de calcul dynamique.....	69

Liste des illustrations

Figure 1 : Implantation d'ARCADIS ESG.....	10
Figure 2 : Organigramme général de la MOE - BA Infrastructures	11
Figure 3 Organigramme de l'agence de Tours	11
Figure 4 : Exemple d'un PICF exécuté par ARCADIS.....	13
Figure 5 : Géométrie générale du PICF [3].....	14
Figure 6 : Transport d'un cadre par camion [10]	15
Figure 7 : Exemple de portique biais [2]	16
Figure 8 : Gousset modélisé par une géométrie réelle à gauche et Gousset modélisé par une section moyenne plate à droite	17
Figure 9 : Gousset modélisé par un axe neutre horizontal	17
Figure 10 : Exemple de Superstructures sur la chaussée du pont de l'Europe (Garde-corps, trottoirs ou candélabre).....	18
Figure 11 : Principe de l'effet Marston	19
Figure 12 : Abaque de calcul du coefficient K de MARSTON.....	19
Figure 13 : Schéma de principe de l'application de la poussée des terres (Source : CHAMOA)	20
Figure 14 : Extrait d'une note de calcul - Moment de flexion à mi-traverse	21
Figure 15 : Découpage de la chaussée en voie (Tableau 4.1 de l'EC1-2).....	22
Figure 16 : Modèle de charge 1 (Tableau 4.2 de l'EC2)	22
Figure 17 : Pondération des charges du système principal (Clause 4.3.2(3) de l'AN de l'EC1-2).....	22
Figure 18 : Capture d'écran de l'arbre de navigation de SOFISTIK	25
Figure 19 : Extensions pour afficher les résultats.....	25
Figure 20 : Capture d'écran d'un extrait du module : "donnée d'entrée"	26
Figure 21 : Capture d'écran du modèle 2D pour un PICF donné.....	27
Figure 22 : Propriétés des matériaux (Béton à gauche, Aciers des armatures à droite)	27
Figure 23 : Schéma de la vue en plan des différentes possibilités de représentation.....	28
Figure 24 : Capture d'écran de la géométrie du modèle (axe de définition des poutres en violet).....	30
Figure 25 : Modélisation d'un cadre dans le modèle CHAMOA.....	30
Figure 26 : Moment sous chargement uniforme (Modèle 1 en haut - Modèle 2 en bas).....	31
Figure 27 : Paramètres jouant sur la précision du modèle	31
Figure 28 : Capture d'écran SODISTIK Graphic - Exemple d'application des charges des remblais techniques multipliées par K_{max} en haut et K_{min} en bas.....	32
Figure 29 : Capture d'écran SOFISTIK Graphic - Exemple d'application des charges UDL.....	33
Figure 30 : Principe de diffusion.....	34
Figure 31 : Capture d'écran SODISTIK Graphic - Exemple d'application des charges TS.....	34
Figure 32 : Quatre exemples de cas de charges TS	35
Figure 33 : En haut : Charges UDL sur remblais côté gauche et droit- En haut : Charges TS sur remblais côté gauche et droit.....	36
Figure 34 : Extrait du manuel SOFISTIK [8]	37
Figure 35 : De gauche à droite, Déformé sous variation linéaire négative, variation linéaire positive, gradient thermique positif, gradient thermique négatif	37
Figure 36 : Définition des actions pour le modèle 2D	38
Figure 37 : Capture d'écran du modèle 3D pour un PICF donné.....	39
Figure 38 : Extrait du manuel SOFISTIK [8]	39
Figure 39 : Cas de positionnement de 1 à 4 de gauche à droite.....	40
Figure 40 : Principe des permutations	41
Figure 41 : Capture d'écran du cas de charge 1 00 0 00.....	42
Figure 42 : Modèle LM1	42
Figure 43 : Définition du convoi 1	43
Figure 44 : Dans le sens de lecture - LC 1 00 0 00 - LC 1 00 1 01 - LC 1 00 2 03 - LC 1 00 3 00	44
Figure 45 : Schéma du fonctionnement des fonctions UDL et TS	45
Figure 46 : Schéma du fonctionnement global de construction des LC.....	45

Figure 47 : Diffusion d'une voie dans le remblai à gauche, diffusion d'un impact dans le remblai à droite [5]	46
Figure 48 : Définition des actions pour le modèle 3D	47
Figure 49 : A gauche MXX sous poids des trottoirs et à droite MXX sous poids de l'enrobé	49
Figure 50 : MXX à l'ELU	50
Figure 51 : Déplacements des nœuds du modèle sous poussée des terres	51
Figure 52 : Choix du type de section	52
Figure 53 : A gauche interface pour définition d'une section circulaire à droite interface pour définition d'une section rectangulaire	53
Figure 54 : Formule de l'incrément dynamique [13]	55
Figure 55 : 3 Possibilités de ferrailage pour un ouvrage biais [2]	56

Glossaire des acronymes

Par ordre alphabétique :

- CHAMOA : Chaine Algorithmique Modulaire Ouvrage d'Art, Algorithme développé par le CEREMA de modélisation des ouvrages
- EC : Eurocode, codes européens de conception et de calcul des ouvrages
- LC : En anglais, Load Case, Cas de charge dans SOFISTIK avec ses effets associés
- LM1 : En anglais : Load Model, Modèle de charges routières préconisés par l'Eurocode
- PIPO : Passage Inférieur en Portique Ouvert
- PICF : Passages Inférieur en Cadre Fermé
- POD : Portiques Ouverts Doubles
- SOFISTIK : Logiciel de modélisation aux éléments finis
- TS : Tandem au sens du modèle LM1
- UDL : Charges uniformément répartis LM1

Présentation de l'entreprise

Arcadis est un groupe international, leader en ingénierie, conseil et management de projet.

Fort de 36 000 collaborateurs, avec un chiffre d'affaires de plus de 3,2 Milliards d'euros, le groupe se situe parmi les 6 premiers mondiaux. Infrastructure, Environnement, Bâtiment et Eau sont les secteurs où Arcadis développe, étudie et gère des projets. La présence internationale du groupe est valorisée au mieux grâce à une organisation globale intégrée entre des sociétés locales fortement implantées

Arcadis ESG, branche française d'Arcadis, compte près de 675 collaborateurs, 9 agences et possède une expérience de plus de cinquante ans dans le domaine de l'ingénierie. Le savoir-faire acquis au cours de ces années lui permet d'intervenir depuis l'étude préliminaire jusqu'à la réception et la maintenance des ouvrages, en fondant la transversalité de ses interventions sur un solide corpus technique et managérial.

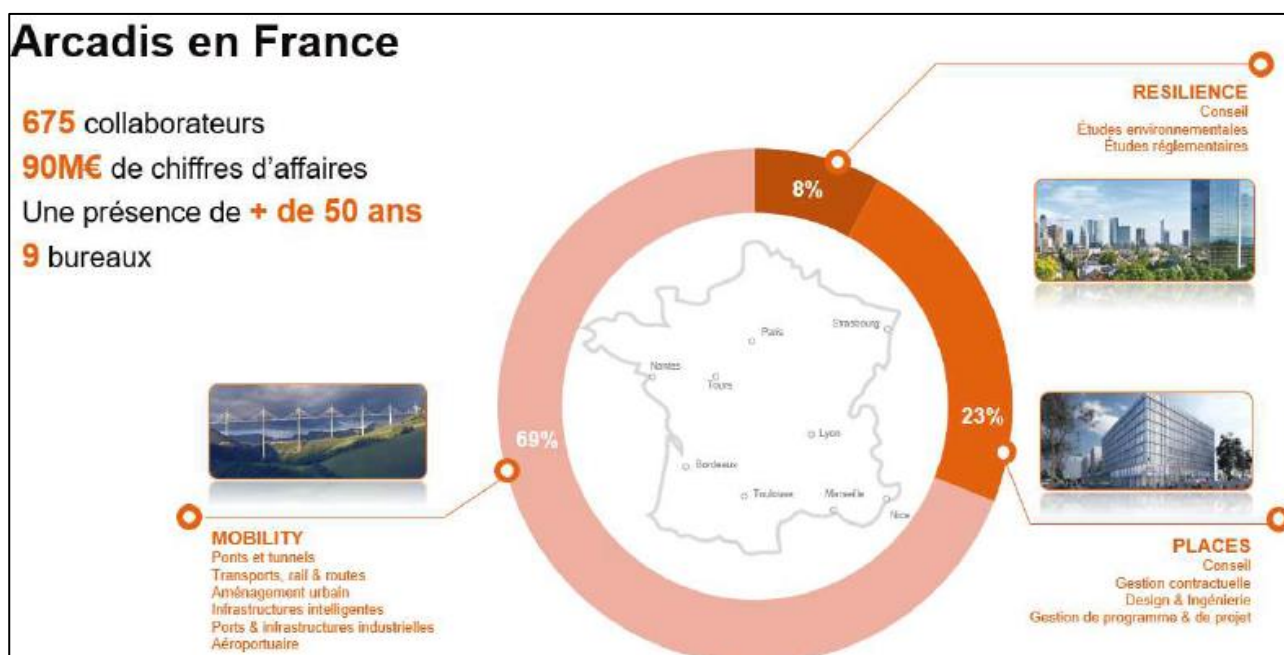


Figure 1 : Implantation d'ARCADIS ESG

Arcadis en France a pris ses racines dans trois sociétés d'ingénierie de grande réputation (EUROPE ETUDES GECTI, SIMECSOL, GESTER) C'est un ensemble de compétences de ces trois entités qu'Arcadis ESG a réuni en 2001 et développe aujourd'hui.

L'entreprise est découpée en trois pôles (Business Area ou BA) : PLACES, RESILIENCE et MOBILITY.

La BA MOBILITY (Infrastructure) couvre l'ensemble des composantes d'un projet, que ce soit la géotechnique, l'ouvrage d'art, les ouvrages spécifiques, les nouvelles mobilités (modes actifs), le partage de la voirie. Elle comprend :

- 2 grands pôles d'activités : Ouvrages & Géotechnique / Transport & Aménagement,
- 10 activités pilotées nationalement et regroupant les ressources des différentes régions,
- 400 personnes environ.

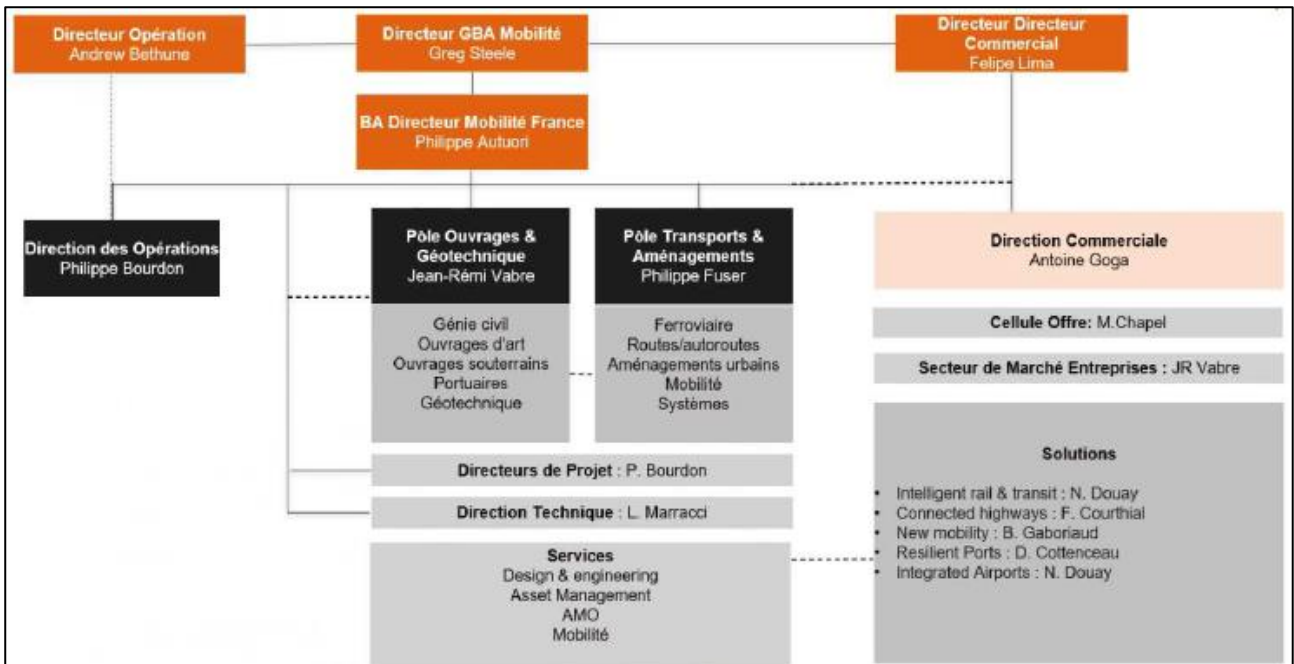


Figure 2 : Organigramme général de la MOE - BA Infrastructures

Le pôle ouvrages d'art de l'agence de Tours compte un total de 15 personnes compétentes dans le domaine des ouvrages d'art et du génie civil. 13 personnes sont spécialisées en études et 2 personnes en suivi de travaux.

Ce pôle intervient aussi bien sur des projets locaux que nationaux sur tous les types de missions : Assistance à Maîtrise d'Ouvrage, Maîtrise d'œuvre, Études d'exécution, Expertise.

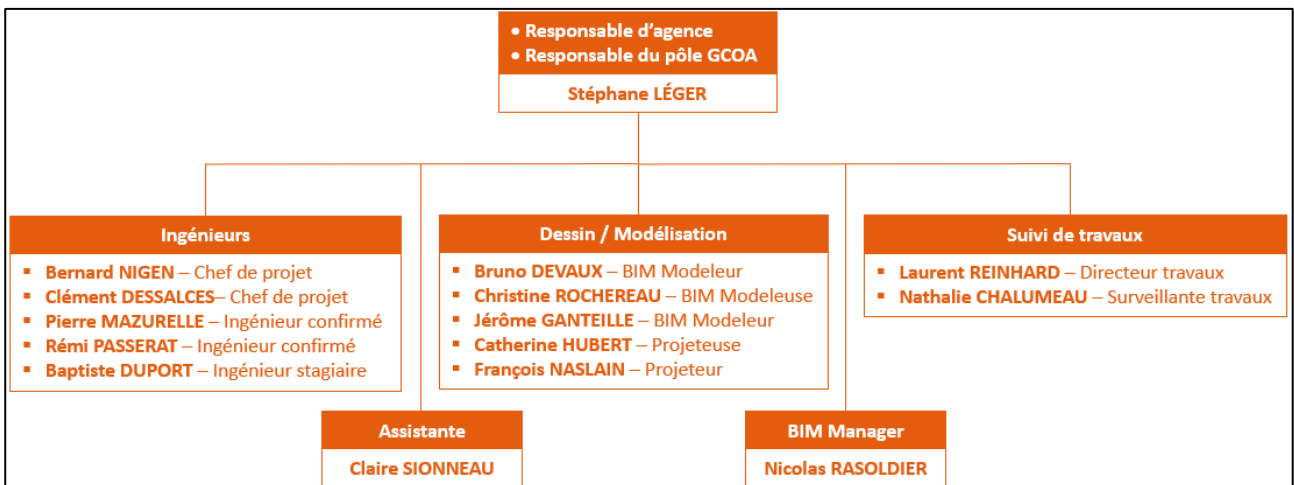


Figure 3 Organigramme de l'agence de Tours

Objectif du TFE

L'objectif de mon travail de fin d'étude est de créer un script de calcul automatisé pour modéliser un ouvrage de type PICF. L'enjeu est de permettre à un ingénieur ARCADIS qui doit modéliser ce type d'ouvrage de créer un modèle sur la base de quelques paramètres.

Pour ARCADIS les avantages sont donc multiples :

Un programme automatisé est un gain de temps pour l'entreprise car la modélisation peut parfois être très chronophage. De plus la modélisation est souvent sources d'erreurs. L'automatisation des tâches permet de se focaliser sur les bonnes questions sans s'en poser trop sur la modélisation. Enfin, la gestion des licences peut-être plus simple et les coûts à long terme peuvent être réduits en évitant les frais récurrents associés à l'utilisation de logiciels tiers.

Deux programmes sont donc réalisés dans le cadre de cette étude :

- **Un modèle 2D à poutres**, adapté aux ouvrages peu biais et peu larges mais avec un temps de calcul réduit.
- **Un modèle 3D à Coque**, adapté à tous les types d'ouvrages mais plus « gourmand » en ressources.

Les enjeux de la programmation sont à la fois techniques, pratiques et exhaustifs. Technique, car il faut s'assurer de correctement représenter la structure. Pratique car il faut s'assurer que le programme soit suffisamment simple d'utilisation pour pouvoir être facilement utilisé par d'autres ingénieurs. Exhaustif car le programme doit pouvoir couvrir avec justesse tous les ouvrages de type Cadre Fermé

Le programme de modélisation est réalisé sur le logiciel SOFISTIK et s'inspire du programme CHAMOA du CEREMA.

1. Présentation des ponts cadres et des portiques

Les ponts cadres et portiques sont des ouvrages intournables du génie civil et particulièrement courants dans la construction autoroutière. Cette famille regroupe :

- Les PICF (Passages Inférieur en Cadre Fermé) : Cadres rectangulaires en béton armé
- Les PIPO (Passage Inférieur en Portique Ouvert) : Ouvrages en forme de U inversé
- Les POD (Portique ouvert double) : PIPO avec un appui intermédiaire sous la traverse

Les PICF (ou cadre) en particulier sont les ouvrages de type passage inférieur le plus construit en France [3], rendus populaires par leur structure monolithique résistante et leur construction simple en 3 phases.



Figure 4 : Exemple d'un PICF exécuté par ARCADIS

Les PICF sont des ouvrages dont la gamme de portée peut aller jusqu'à 12m (Au-delà les portiques sont plus adaptés). Le radier permet de bien répartir les charges transmises aux fondations (Pression de l'ordre de 100 kPa [2]) et donc repose correctement sur tous les types de sols.

La géométrie de l'ouvrage est assez simple : La voie franchie est supportée par un radier faisant office de fondation. Les piédroits, encastrés sur le radier, servent de culée et de mur de soutènement. La traverse, encastrée sur les piédroits, sert de support à la voie portée. (Voir Figure 5).

L'ouvrage est généralement complété par des murs en retour ou des murs en aile (en général indépendants de l'ouvrage principal d'un point de vue structurel) qui assurent le soutènement des remblais.

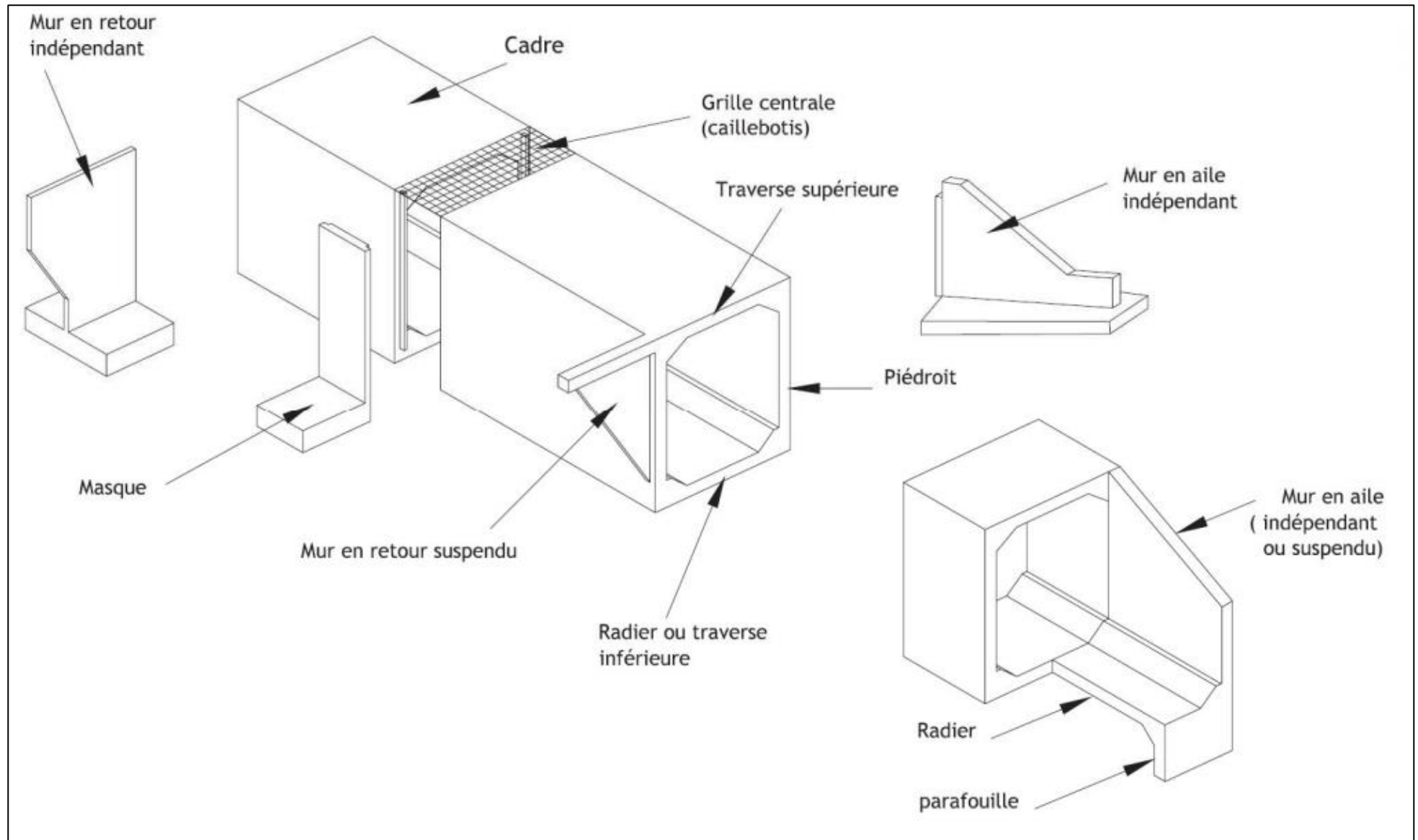


Figure 5 : Géométrie générale du PICF [3]

Les cadres et les portiques sont généralement coulés en place, mais ils peuvent également être préfabriqués, transportés et installés sur sites.

Ouvrage coulé en place :

Les fondations sont exécutées avec mise en place des armatures verticales en attente des piédroits.

De même, pour la première reprise de bétonnage, les piédroits sont coulés avec les armatures en attente de la traverse. Pour la seconde reprise de bétonnage, la traverse peut être exécutée à l'aide d'un cintre.

Ouvrage partiellement préfabriqué :

Les fondations sont généralement coulées en place. Les piédroits et le tablier peuvent être préfabriqués en veillant à la qualité de fabrication et de mise en œuvre.

Ouvrage totalement préfabriqué :

L'ouvrage est préfabriqué en un seul bloc (radier, piédroit et traverse) qui peut être décliné en plusieurs éléments à assembler ou emboîter dans la longueur à l'aide de joints. Il est également possible dans ce cas-là de mettre en place l'ouvrage à l'aide d'un procédé de ripage (fonçage horizontal ou technique du coussin d'air).



Figure 6 : Transport d'un cadre par camion [10]

Dans tous les cas, après exécution de l'ouvrage, les remblais sont compactés symétriquement de chaque côté. Le compactage se fait par couches de faible hauteur, pour ne pas endommager le cadre ou créer une poussée des terres trop dissymétrique.

2. Comment modéliser un PICF ?

On répertorie ici les phénomènes qui ont une incidence sur la structure et son dimensionnement

2.1 Matériaux

Le PICF est un ouvrage en Béton armé. Le béton armé est un matériau composite mélange de béton et de barres d'acier.

Le béton est défini essentiellement par sa résistance caractéristique à la compression f_{ck} .

Les armatures sont des aciers sous forme de barre ou de fil dont la surface présente des aspérités ou des reliefs afin d'améliorer l'adhérence avec le béton (Haute adhérence = HA) caractérisés par leur nuance (en MPa)

2.2 Géométrie

La structure est modélisée par un cadre simple. Les dalles de transition, si elles sont modélisées, le sont par des efforts agissant sur la structure. Les éléments qui ne sont pas structurellement attachés au cadre (Mur retour, mur en aile) ne sont pas modélisés

2.2.1 Biais de l'ouvrage

Le biais d'un ouvrage correspond à l'angle formé par l'intersection entre l'axe de la voie franchie et l'axe de l'ouvrage. Il est usuellement donné en grades (un angle droit mesure 100 grades).



Figure 7 : Exemple de portique biais [2]

Le comportement des ouvrages biaisés est différent de celui des ouvrages droits. Les états de flexion et de torsion ne sont pas les mêmes près des angles [2].

Remarque : Il faut faire attention à la définition des longueurs. Elles peuvent être définies selon la direction biaisée ou droite.

2.2.2 Modélisation des goussets

La modélisation des goussets de la structure était une vraie problématique qui s'est posée lors de la modélisation du PICF.

Une première intuition est de suivre la géométrie réelle, c'est-à-dire modéliser un gousset d'épaisseur variable avec extrados horizontal (voir Figure 8). Cette représentation présente toutefois un problème,

car l'axe neutre du tablier n'est plus horizontal, mais en voûte. Cette voûte étant inverse au sens de la flexion, elle est favorable vis-à-vis des moments dans le tablier (Ce que l'on nomme effet voûte). C'est probablement le comportement réel, mais on s'éloigne ici d'un calcul manuel.

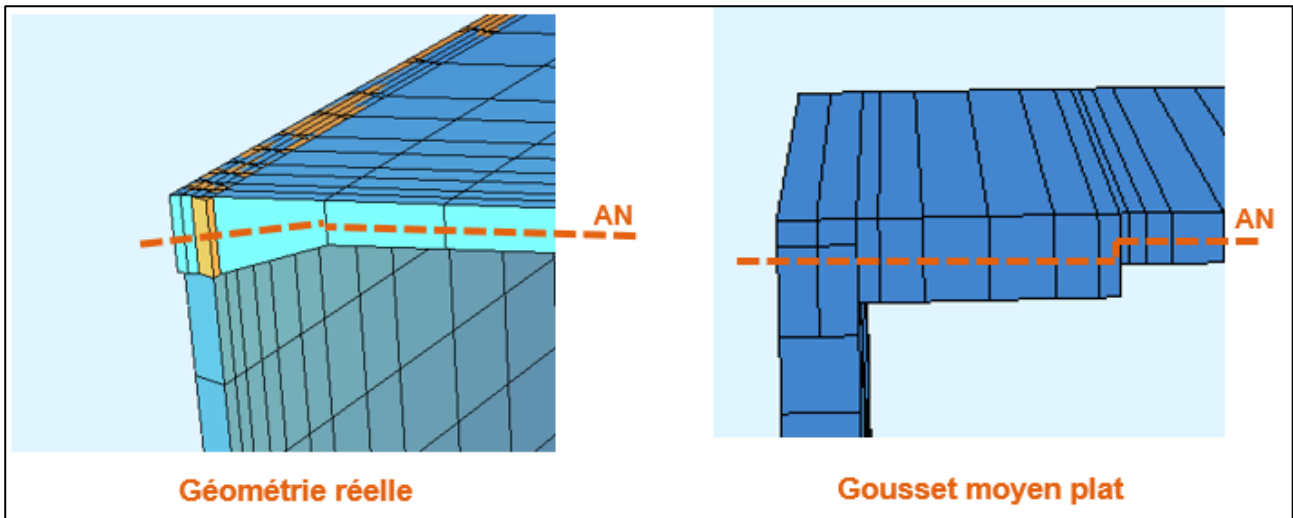


Figure 8 : Gousset modélisé par une géométrie réelle à gauche et Gousset modélisé par une section moyenne plate à droite

Une deuxième intuition est de modéliser un gousset moyen plat (Solution choisie par le modèle PIPO déjà réalisé). Cette solution réduit en effet le phénomène de voûte, mais ne permet de calculer précisément le ferrailage dans le gousset car le calcul de ferrailage dépend de l'épaisseur de béton.

La solution retenue consiste à tirer au droit l'axe neutre de manière qu'il reste horizontal, puis à construire la section variable centrée sur cet axe neutre (Voir Figure 9). On conserve donc l'épaisseur réelle de béton pour le calcul de ferrailage, tout en annulant le phénomène de voûte.

Il s'agit également de la solution qui est mise en œuvre par CHAMOA, et c'est cela qui nous a fait retenir cette géométrie de gousset

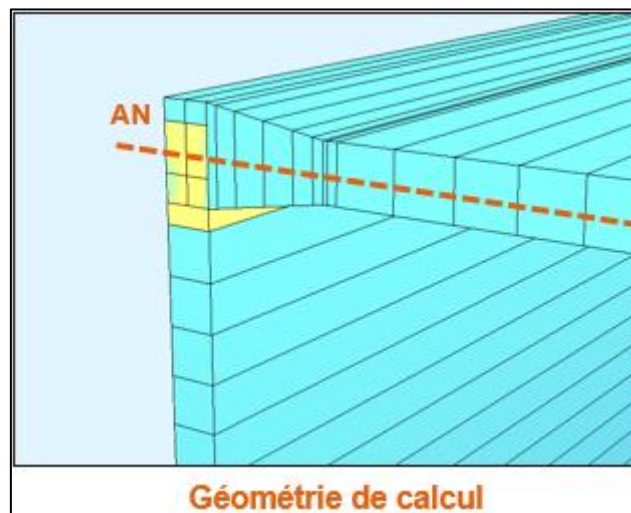


Figure 9 : Gousset modélisé par un axe neutre horizontal

La géométrie de calcul est donc peu intuitive, car elle ne suit pas la géométrie réelle. C'est pourtant cette solution qui est à mettre en œuvre si l'on recherche à calculer au plus juste les efforts dans le tablier.

2.2.3 Modélisation du sol

La modélisation des appuis de la structure se fait par des ressorts verticaux et horizontaux sous le radier. Si le sol de fondation est caractérisé par son module d'YOUNG, la raideur verticale peut être calculée par la formule empirique donnée au §3.2 du guide technique CHAMOA-PICF [6]

$$k_v = \frac{E_{sol} L + B}{2B L}$$

- B : Largeur de la fondation
- L : Longueur de la fondation
- E_{sol} : Module d'Young du sol de fondation

Une formule plus usuelle existe également pour calculer la raideur à partir des caractéristiques pressiométriques du sol

$$\frac{1}{k_v} = \frac{\alpha B}{9 E_M} \lambda_c + \frac{2 B_0}{9 E_M} \left(\lambda_d \frac{B}{B_0} \right)^\alpha$$

- B_0 Largeur conventionnelle = 0.60 m
- α Coefficient rhéologique
- λ_c, λ_d Coefficients de formes

2.3 Charges

2.3.1 Poids propre et Superstructures

La structure et les superstructures agissent par leur poids dans le modèle. Ce sont l'enrobé, la chaussée, les trottoirs et les éventuels remblais qui peuvent se situer sur la traverse. Globalement, il s'agit de l'ensemble des charges permanentes qui agissent sur le tablier.



Figure 10 : Exemple de Superstructures sur la chaussée du pont de l'Europe (Garde-corps, trottoirs ou candélabre)

2.3.2 Remblais sur traverse et coefficient de Marston

La conception du PICF peut prévoir la possibilité de remblayer la traverse. Dans ce cas, il faut prendre en compte le poids du remblai.

Selon la théorie de MARSTON, la rigidité des cadres conduit à un plus fort tassement des terres adjacentes que celui des terres qui surmontent l'ouvrage. Il y a donc une transmission par frottement d'une partie de l'effet des terres adjacentes sur le remblai (voir Figure 11)

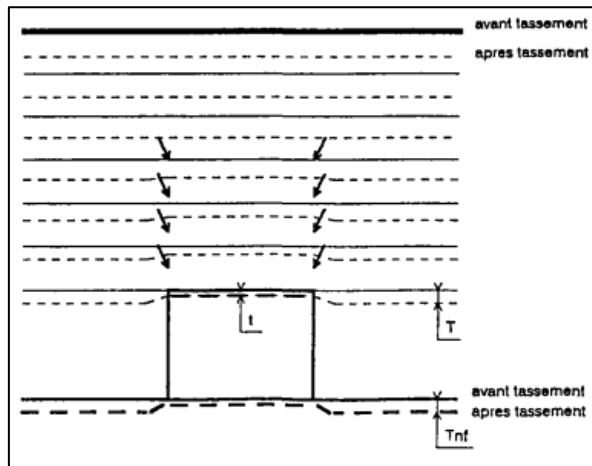


Figure 11 : Principe de l'effet Marston

Il est possible de modéliser ce phénomène en pondérant le poids du remblai sur l'ouvrage par un coefficient K de MARSTON. Ce coefficient peut être calculé par l'abaque donné par le *Programme de calcul PICF-EL du SETRA (1991)* [1]

Avec :

- H_{remb} : Hauteur de remblai
- D : Portée du cadre

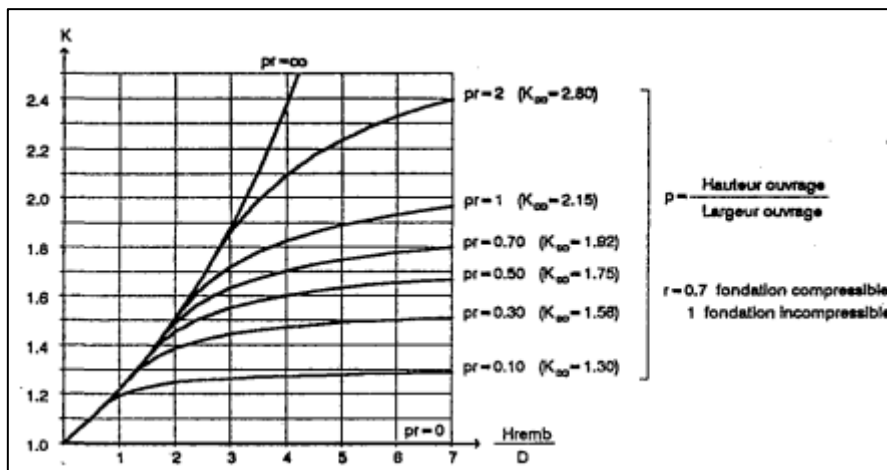


Figure 12 : Abaque de calcul du coefficient K de MARSTON

2.3.3 Poussée des remblais techniques

Les remblais techniques sont situés de part et d'autre de l'ouvrage et sont pris en compte dans le modèle suivant le principe de la Figure 13.

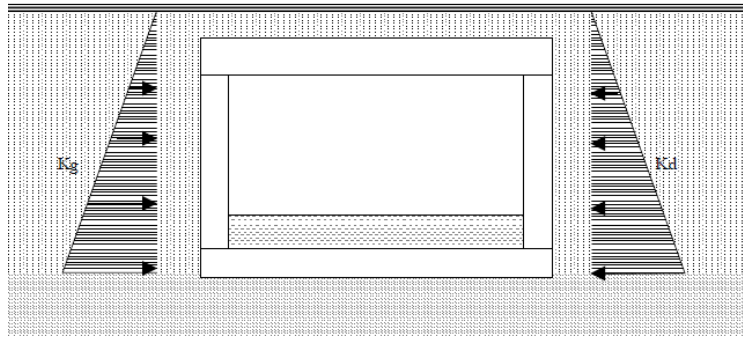


Figure 13 : Schéma de principe de l'application de la poussée des terres (Source : CHAMOA)

La poussée des terres est modélisée suivant un diagramme triangulaire :

$$\sigma_h = K \cdot \sigma_v \text{ et } \sigma_v = \gamma_{sol} Z$$

Avec :

- σ_h Contrainte horizontale dans le sol
- σ_v Contrainte verticale dans le sol
- γ_{sol} Densité du sol
- Z Profondeur mesurée depuis le remblai.
- K Coefficient de pression des terres

Les remblais sont supposés symétriques, on a donc $K_g = K_d = K$

Le coefficient de pression des terres K n'est pas décrit précisément car il dépend notamment de la qualité de compactage mis en œuvre pendant l'exécution. Il tient également compte du coefficient K_0 , coefficient des terres au repos qui considère qu'il n'y a aucun déplacement de la structure et de K_a qui correspond à la poussée active (le milieu du piédroit peut éventuellement se déplacer).

Faire l'enveloppe de ces deux cas permet de se mettre du côté de la sécurité pour la traverse ou les piédroits. Le coefficient est donc pris entre deux valeurs extrêmes K_{min} et K_{max} .

Remarque : Les paramètres des remblais de chaque côté de l'ouvrage doivent toujours rester identiques. Il est important, selon le coefficient que l'on choisit, de l'appliquer de manière identique de chaque côté (il est impossible de prendre K_{min} à gauche et K_{max} à droite par exemple ce qui serait trop défavorable). J'ai donc dû faire en sorte que le programme choisisse bien une unique valeur de K

2.3.4 Retrait

Le retrait est une diminution globale du volume du béton non chargé au cours de son durcissement. L'Eurocode 2 distingue deux phénomènes. Le retrait **endogène** (ou auto-dessiccation) est dû aux réactions chimiques qui ont lieu durant la prise du béton : Les volumes des réactifs sont plus gros que le volume du produit. Le retrait de **dessiccation** (ou retrait de séchage) est dû au rééquilibrage du niveau d'humidité interne au béton avec l'extérieur.

Ces deux effets se cumulent. La déformation totale dû au retrait (ε) est la somme de la déformation endogène (ε_{ca}) et de la déformation de dessiccation (ε_{cd})

$$\varepsilon = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

Le retrait est calculé selon l'Eurocode 2. Il est appliqué uniquement en traverse et à un temps infini après coulage du béton. L'ordre de grandeur de ce retrait est de 10^{-4} .

Le retrait infini de dessiccation est calculé à partir du rayon moyen $h_o = 2Ac/u$ où

- Ac : Aire de la section transversale du béton
- u : Périmètre de la section exposée directement à la dessiccation

L'ouvrage étant monolithique et coulé par étape (radier, piédroit et traverse), les déformations imposées engendrent des efforts dans la traverse qui doivent être pris en compte.

2.3.5 Fluage

Le fluage correspond à une déformation sur le long terme du béton lorsqu'il est soumis à une charge. Selon l'Eurocode 2, la prise en compte du fluage se fait par l'utilisation du module effectif du béton [EC2-1-1 7.4.3(5)] pour les charges long terme (Poids propre, superstructures ...) :

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_0)}$$

Avec :

- $E_{c,eff}$: Module effectif du béton
- $E_{c,m}$: Module de déformation instantanée
- t_0 : âge de la première mise en charge
- $\varphi(\infty, t_0)$: Coefficient de fluage

A défaut de justifications particulières, il est usuel de considérer $\varphi(\infty, t_0) = 2$ donc $E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{3}$

Remarque : A noter que dans le cas du PICF, l'ouvrage est entièrement en béton.

Usuellement, les efforts dus au fluage sont négligés. Le module différé est uniquement considéré pour le calcul des déformations sous les effets à long terme.

2.3.6 Température

L'action thermique sur un pont en béton armé se décompose en deux phénomènes.

La **variation uniforme** de température correspond à la température globale de l'ouvrage. En été, l'ouvrage a tendance à se dilater et inversement en hiver, il se contracte.

Le **gradient thermique** correspond à une différence de température entre deux parties d'un élément. Par exemple, une poutre isostatique dont l'extrados est chauffé par le soleil allonge la fibre supérieure et raccourcit la fibre inférieure.

Dans le cas du PICF, on applique les effets thermiques uniquement sur la traverse. Ceci pour deux raisons :

- Le programme CHAMOA limite aussi les effets thermiques à la traverse
- Il n'y a pas de règles spécifiques pour les piédroits sur ce sujet dans l'Eurocode

L'ouvrage étant monolithique, les déformations gênées créent des efforts dans la structure qui doivent être pris en compte dans le calcul.

Remarque : Les effets de la température ont été négligés dans une première version du modèle. Or, en consultant d'anciennes notes de calcul réalisées sur CHAMOA, je me suis rendu compte que les efforts thermiques ont un ordre de grandeur non négligeable, et peuvent être dimensionnants.

Barre	Abscisse	Enveloppe ch. perm.	Enveloppe thermique	Q frequent compat.T	Q frequent incompat.T	ELS frequ.
TRAVERSE	5.096 Min	-5309.2	-4915.5	-1712.9	-2582.3	-10225.
	Max	-1939.4	138.79	37.852	0.0000	-1800.6

Figure 14 : Extrait d'une note de calcul - Moment de flexion à mi-traverse

Ceci s'explique par le fait que les effets de température ne s'appliquent que sur la traverse.

Or le PICF étant un ouvrage très rigide les déformations imposées provoquent des efforts importants. J'ai donc finalement intégré les effets thermiques au modèle.

2.3.7 Charges LM1 au sens de l'Eurocode

Les surcharges routières suivent le modèle LM1 décrit en détail dans l'Eurocode 1-2.

Le découpage de la chaussée se fait en voie de circulation dont le nombre et la largeur sont calculé selon le tableau suivant :

Largeur de la chaussée w	Nombre de voies conventionnelles	Largeur d'une voie conventionnelle w_i	Largeur de l'aire résiduelle
$w < 5,4$ m	$n_i = 1$	3 m	$w - 3$ m
$5,4 \text{ m} \leq w < 6$ m	$n_i = 2$	$\frac{w}{2}$	0
$6 \text{ m} \leq w$	$n_i = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right)$	3 m	$w - 3 \times n_i$

NOTE Par exemple, pour une chaussée ayant une largeur de 11 m, $n_i = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right) = 3$, et la largeur de l'aire résiduelle est $11 - 3 \times 3 = 2$ m.

Figure 15 : Découpage de la chaussée en voie (Tableau 4.1 de l'EC1-2)

Le modèle de charge LM1 consiste en deux systèmes de charges qui se superposent par voies distinctes :

- Charges concentrées à double essieu (TS : Tandem) : $\alpha_Q Q_k$
- Charges uniformément réparties (UDL) : $\alpha_q q_k$

Emplacement	Tandem TS	Système UDL
	Charges d'essieu Q_{ik} (kN)	q_{ik} (ou q_{rk}) (kN/m ²)
Voie n° 1	300	9
Voie n° 2	200	2,5
Voie n° 3	100	2,5
Autres voies	0	2,5
Aire résiduelle (q_{ik})	0	2,5

Figure 16 : Modèle de charge 1 (Tableau 4.2 de l'EC2)

Avec α coefficient d'ajustement (qui dépend de la classe de l'ouvrage)

Pour les ouvrages neufs ne comportant pas de limitation de tonnage, deux classes de trafic sont définies par les jeux de coefficients suivants :

Classe de trafic	α_{Q1}	α_{Qi} ($i \geq 2$)	α_{q1}	α_{qi} ($i \geq 2$)	α_{qr}
1 ^{ère} classe	1,0	1,0	1,0	1,2	1,2
2 ^e classe	0,9	0,8	0,7	1,0	1,0

Il y a lieu de définir la classe de trafic pour le projet individuel.

Figure 17 : Pondération des charges du système principal (Clause 4.3.2(3) de l'AN de l'EC1-2)

La position/numérotation des voies et la position des charges est à faire de façon à obtenir l'effet le plus défavorable pour la vérification à effectuer.

2.3.8 Charges sur remblais

Les surcharges routières agissent sur l'ouvrage, mais également sur les remblais contigus

Les remblais poussent alors perpendiculairement aux piédroits, qui agissent en flexion sur la traverse (moment négatif) qui vient contrebalancer les effets directs des surcharges sur la traverse. Ces charges ajoutent également des efforts dans les piédroits.

Pour le coefficient de poussée des terres, on pourrait prendre le même coefficient que celui qui a été choisi au §2.3.3. Cela signifie donc qu'il faudrait effectuer deux calculs différents en fonction de K_{min} et K_{max} .

Par simplification, on s'inspire plutôt du §3.4.2 du guide CHAMOA [6] qui précise que « *Le calcul de la poussée des charges d'exploitation pourra être fait raisonnablement à partir d'une valeur moyenne du coefficient de poussée K représentative de la diffusion des charges à travers le remblai que l'ouvrage soit de type portique (Pont Portique et Cadre) soit de type culé d'ouvrages d'art* ».

Il est à noter le guide Eurocode 0 et 1 [5] précise également que les charges seront réduites de 30 % pour tenir compte de « *la réduction des amplifications dynamiques par rapport aux charges de l'ouvrage* »

2.4 Combinaisons

2.4.1 Action permanente

L'action permanente G regroupe l'ensemble des charges permanentes qui s'appliquent à l'ouvrage. Dans le cas du PICF, il s'agit :

- Du poids de l'ouvrage
- Du poids des superstructures
- De la poussée des remblais techniques

On considère l'enveloppe des charges permanentes, c'est-à-dire la combinaison la plus défavorable (obtenue à l'aides des coefficients les plus défavorables).

2.4.2 Action variable

L'action variable Q regroupe ici l'ensemble des charges routières :

- Charges UDL sur traverse
- Charges TS sur traverse
- Charges UDL sur remblais
- Charges TS sur remblais

On considère l'enveloppe des charges variables, c'est-à-dire la combinaison des charges les plus défavorables.

2.4.3 Actions thermiques

L'action thermique T regroupe les deux charges thermiques calculées : la variation uniforme de température noté T_u et le gradient thermique noté G_T . On considère la combinaison intermédiaire la plus défavorable :

- $T_u + 0.35G_T$
- $0.75T_u + G_T$

2.4.4 Combinaisons d'actions

4 combinaisons de calculs sont étudiées :

- ELS Quasi permanent : $G + 0.5T$
- ELS Fréquent : $G + 0.4Q_{UDL} + 0.75Q_{TS} + 0.6T$
- ELS Caractéristique : $G + 0.4Q_{UDL} + 0.75Q_{TS} + 0.6T$
- ELU : $1.35G + 1.35Q + 1.5T$

3. Fonctionnement du Template SOFISTIK

3.1 Fonctionnement général

Un programme SOFISTIK est découpé en modules élémentaires. Ces modules peuvent être définis par une interface ou par texte.

- La composition des modules par l'interface présente l'avantage d'être plus lisible, et plus facile à utiliser.
- La composition des modules par texte (ou TEDDY) est plus austère, mais est puissante et généralement moins source d'erreur.

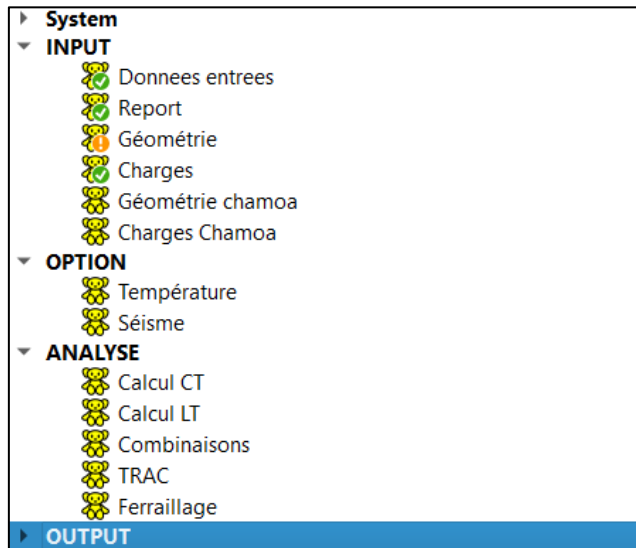


Figure 18 : Capture d'écran de l'arbre de navigation de SOFISTIK

Ces modules sont des découpages du code de calcul qui peuvent être initiés dans n'importe quel ordre.

Le langage de programmation utilisé est propre à SOFISTIK (CADINP). Il permet notamment d'introduire des variables et donc d'automatiser les calculs.

Une fois le calcul terminé, les résultats sont stockés dans la base de données. On peut chercher graphiquement les résultats de la modélisation dans les extensions de SOFISTIK :

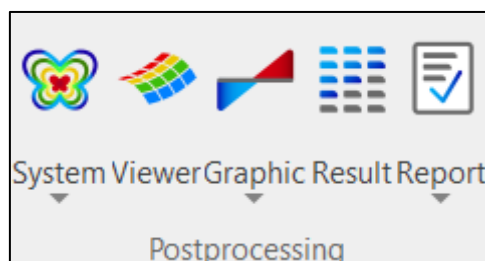


Figure 19 : Extensions pour afficher les résultats

- SYSTEM et VIEWER permettent d'observer en 3D la structure avec représentation rapide des contraintes/déformations par cas de charges (pratique pour observer rapidement la vraisemblance de la modélisation)
- GRAPHIC est l'outil le plus utilisé des cinq, car il permet d'afficher graphiquement les résultats des calculs.
- RESULT permet d'afficher sous forme de tableaux les résultats des calculs
- REPORT produit un rapport directement issu des calculs (peut servir de base pour une note de modélisation ou de calcul).

3.2 Paramétrage des variables

Le premier module est nommé « données d'entrées » : Il s'agit du seul module que l'utilisateur doit manipuler. Ce module consigne tous les paramètres de calculs qui décrivent l'ouvrage à modéliser :

- La géométrie (Dimension de l'ouvrage, biais, découpage de la chaussée)
- Les paramètres des matériaux
- La classe de l'ouvrage
- Les paramètres géotechniques
- Les paramètres relatifs à la précision du modèle (Précision du maillage)

Chaque ligne de commande a la même structure (Figure 20) :

```
$-----  
$-----/!\Diffusion des charges/!\-----  
$-----  
$Chaussée  
STO#hdif_c 0.8      $[m]Hauteur de diffusion dans la chaussée  
STO#beta_c 45      $[°]Angle de diffusion dans la chaussée  
$Remblais  
STO#hdif_r #h_talus $[m]Hauteur de diffusion dans le remblais  
STO#beta_r 30      $[°]Angle de diffusion dans le remblais  
$Dalle  
STO#hdif_d #ET/2   $[m]Hauteur de diffusion dans la demi-dalle  
STO#beta_d 45      $[°]Angle de diffusion dans la demi-dalle
```

Figure 20 : Capture d'écran d'un extrait du module : "donnée d'entrée"

Le stockage de la variable est initié par la commande STO. La première instruction est le nom de la variable à stocker. Il commence par un dièse (#) et est grisé comme vu au-dessus. La seconde instruction est la valeur attribuée à la variable et est séparée de la première instruction par un espace.

Ainsi la première commande consiste à créer la variable #hdif_c et lui attribuer la valeur 0.8.

Le signe \$ introduit un commentaire (texte de couleur vert) : Il n'est pas pris en compte par le programme et permet seulement d'améliorer la lisibilité du code pour les utilisateurs. Pour une meilleure compréhension, un commentaire est systématiquement associé à l'attribution d'une variable. Il détaille l'unité du paramètre (entre crochets) et le sens de ce paramètre pour le programme.

Donc la première commande correspond à la hauteur de diffusion dans la chaussée, et est en mètre.

Le script qui répertorie les données d'entrées est donnée en annexe 3

3.3 Note de calcul

En utilisant l'extension REPORT pour le module report (juste après le module donné d'entrées), l'utilisateur peut afficher une fiche récapitulative des données d'entrées ainsi que des dessins en plan de la structure. Ce module peut être exécuté avant de lancer la totalité des calculs.

Ce rapport a une double fonction :

- Pouvoir contrôler rapidement la vraisemblance du modèle
- Servir de note de modélisation automatique pour le rapport de l'ingénieur qui utilise le programme

Un exemple de ce rapport est donné en annexe 2.

4. Modélisation 2D – Modèle à poutre

Le premier modèle que j'ai réalisé est un modèle plan 2D.

Il se base sur la théorie des poutres. Ce modèle est valable dans la mesure où l'ouvrage est plan, c'est-à-dire dans l'hypothèse d'un biais faible (Biais entre 70 et 100 grades).

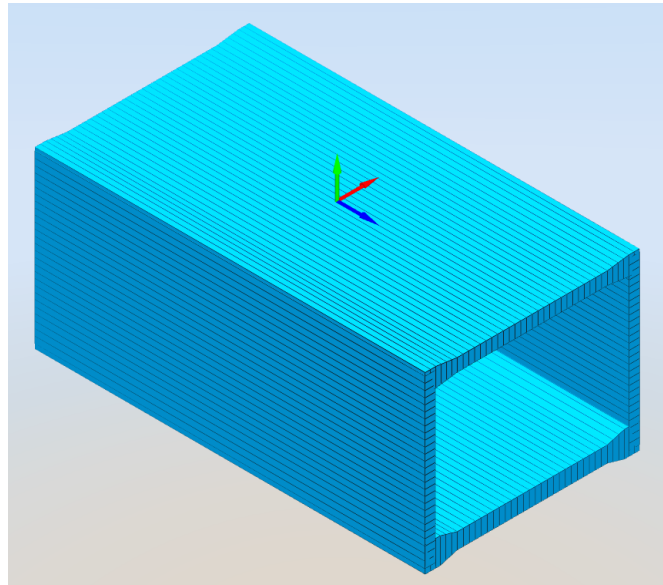


Figure 21 : Capture d'écran du modèle 2D pour un PICF donné

L'avantage de ce type de modélisation est que les calculs sont plus rapides qu'un modèle 3D, et que les efforts sont plus facilement exploitables.

Cependant, ce modèle n'est valable que si l'ouvrage à modéliser par un modèle plan. Ce n'est par exemple pas le cas pour un biais fort ou un ouvrage large. (Distribution non uniforme des charges notamment de trafic).

4.1 Matériaux

Les caractéristiques des matériaux suivent les normes de l'Eurocode.

General properties		General properties			
<input type="checkbox"/> Self weight:	γ	25.0 kN/m ³	<input type="checkbox"/> Self weight:	γ	78.5 kN/m ³
<input type="checkbox"/> Density:	ρ	2400.0 kg/m ³	<input type="checkbox"/> Temperature coeff.:	α	0.120e-4 1/K
<input type="checkbox"/> Temperature coeff.:	α	1.000e-5 1/K	<input type="checkbox"/> Elastic modulus:	E	200000 N/mm ²
<input checked="" type="checkbox"/> Elastic modulus:	E	34077 N/mm ²	<input type="checkbox"/> Poisson ratio:	μ	0.300 -
<input type="checkbox"/> Poisson ratio:	μ	0.200 -	<input type="checkbox"/> Shear modulus:	G	76923 N/mm ²
<input type="checkbox"/> Shear modulus:	G	14199 N/mm ²	<input type="checkbox"/> Compression modulus:	K	166667 N/mm ²
<input type="checkbox"/> Compression modulus:	K	18932 N/mm ²			

Figure 22 : Propriétés des matériaux (Béton à gauche, Aciers des armatures à droite)

Les paramètres du béton sont par défaut ceux du logiciel pour un béton de la classe demandée (Les paramètres du logiciel suivent les Eurocodes). Le module du béton peut être modifié en fonction du calcul que l'on souhaite effectuer (Court terme ou long terme)

Les aciers d'armatures sont des aciers à haute adhérence (HA) dont les paramètres sont par défaut ceux du logiciel. (Les paramètres du logiciel suivent les Eurocodes)

Remarque : La formule utilisée pour le calcul de E_{cm} est donnée par l'Eurocode :

$$E_{cm} = 22\,000 \times \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3}$$

En vérifiant avec un modèle d'un pont cadre réalisé sur un ouvrage (sans paramétrage, sans bordereau de données), j'ai remarqué une erreur. Dans une première version, cette formule avait un problème d'unité rendant le pont 1000 fois plus souple. Cette erreur était invisible car les efforts ne sont pas affectés par la rigidité de l'ouvrage (dans le cas d'une structure constituée d'un matériau unique).

Ce n'est qu'en regardant les déformations sous poids propre que j'ai pu me rendre compte que la flèche était de 7m ! J'ai donc corrigé le modèle avec la formule correcte.

C'est par ce cheminement que je me suis rendu compte qu'il était important de vérifier (même rapidement) la validité d'un modèle par des tests simples comme le calcul de la flèche, la déformée ou le moment à mi-travée.

4.2 Géométrie

4.2.1 Biais de l'ouvrage

Le sujet le plus délicat à aborder sur le modèle à poutre (2D) est l'introduction de la géométrie biaisée de l'ouvrage dans un modèle plan.

Une première idée est de modéliser au choix la géométrie de l'ouvrage selon la coupe droite (1) ou la coupe biaisée (2). Or on sent intuitivement que le comportement réel de l'ouvrage est hybride.

De plus, comment représenter l'intégralité des charges ? Certaines s'appliquent sur la largeur droite comme les charges routières (3) tandis que d'autres sur la largeur biaisée comme la pression des terres des remblais techniques (4).

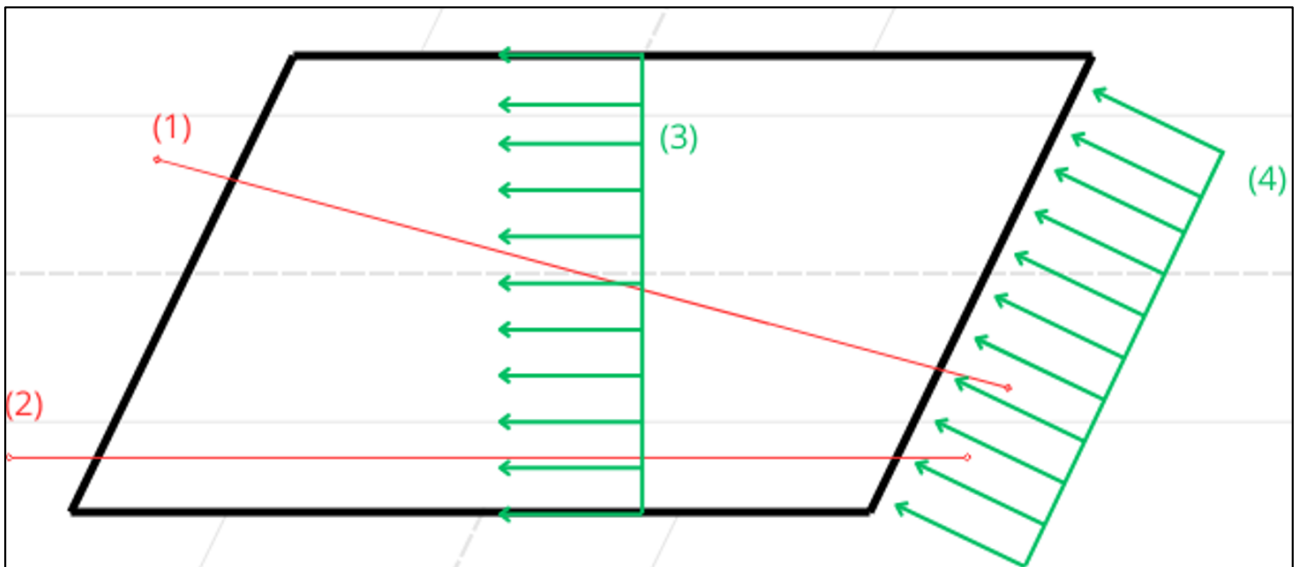


Figure 23 : Schéma de la vue en plan des différentes possibilités de représentation

Le guide CHAMOA [6] propose une modélisation qui a servi de base pour la géométrie du programme.

Pour la définition des sections (coupe transversale) :

- La traverse est modélisée par sa largeur droite et son épaisseur réelle
- Les piédroits sont modélisés par leur largeur droite et leur épaisseur biaisée
- Le radier est modélisé par sa largeur droite et son épaisseur réelle

Pour la coupe longitudinale :

- La portée est modélisée par la portée biaisée
- Les piédroits sont modélisés jusqu'en pied de radier

Le §3.2.1 du Guide CHAMOA [6] précise en effet : « *La traverse est modélisée selon la portée biaisée, ce qui est un peu sévère pour le calcul des efforts en travée par rapport au comportement réel. En effet la portée mécanique est intermédiaire entre la portée biaisée et la portée droite. Par contre les piédroits sont modélisés avec les épaisseurs biaisées, ce qui réduit les moments en travée de la traverse et augmente les moments sur appui et fournit ainsi des résultats plus proches de la réalité.* »

Les charges sont appliquées comme dans la réalité :

- Sur traverse : Selon la largeur droite
- Sur Piédroit : Selon la largeur biaisée

Remarque : J'avais deux possibilités pour définir la section transversale en donnée d'entrée, prendre la section biaisée ou la section droite., chacune ayant ses avantages.

La section biaisée est « *grosso modo* » celle de calcul, elle est donc plus facile à implémenter tandis que la section droite est plus logique (et c'est la solution choisie par CHAMOA)

J'ai finalement pris le parti le plus évident pour l'utilisateur c'est-à-dire la section droite.

4.2.2 Construction du modèle

Les nœuds sont situés en coin de cadre, et à chaque changement de section (Tablier, radier, piédroits, goussets, et méplats).

Les nœuds sont ensuite reliés par des droites caractérisées par une section. Les sections sont données avec la largeur définie au §4.2.1 (Il aurait été possible par exemple de définir une largeur en mètre linéaire).

4.2.3 Axe de définition des poutres

Les poutres sont des éléments plans qui sont définies, à partir d'un segment qui relie deux points de l'espace. Leur épaisseur est donc fictive, pour l'application des charges, et n'est qu'un artifice de calcul. Il existe donc plusieurs possibilités pour représenter une poutre à partir de la position de l'axe de définition, on peut suivre l'axe neutre, l'intrados ou l'extrados de la poutre.

Le positionnement de l'axe affecte notamment la lecture des efforts (Dans SOFISTIK, les efforts sont toujours donnés à l'axe neutre) et l'application des charges.

La solution qui a été retenue est la définition des poutres par l'extrados (Voir Figure 24). C'est le critère d'application des charges qui m'a fait choisir cette solution car on est sûr d'appliquer la totalité des efforts.

- Pour les piédroits, la totalité des efforts des poussées des terres sont bien pris en compte (de la tête de piédroit au pied du radier)
- Pour la traverse, la totalité des surcharges routières sont prises en compte

Cette approche permet donc d'avoir le calcul exact des descentes de charges mais peut-être défavorable vis-à-vis des efforts dans la structure.

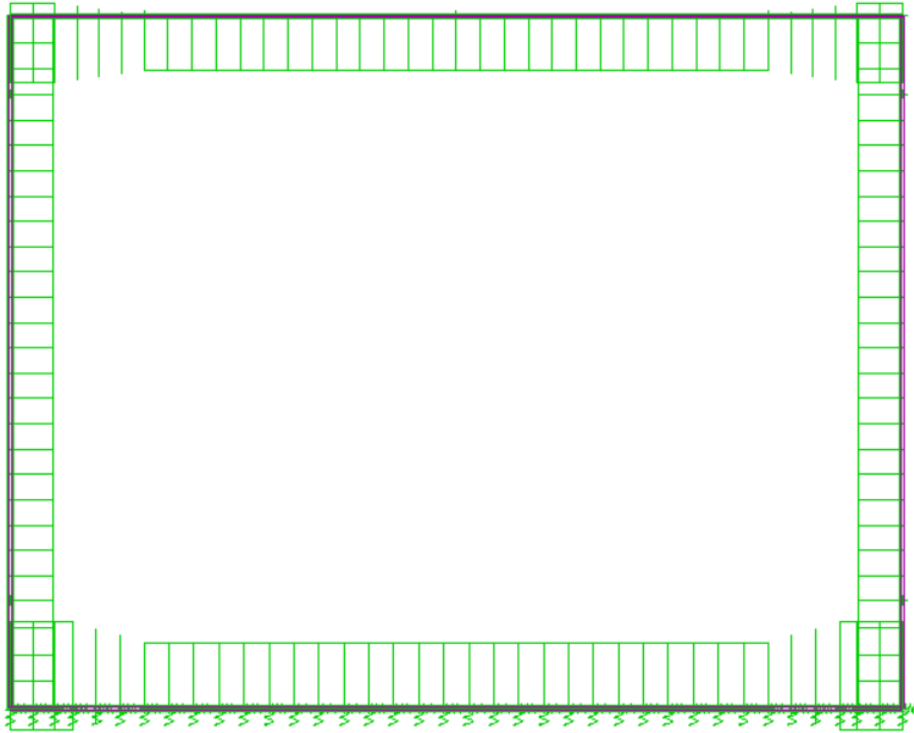


Figure 24 : Capture d'écran de la géométrie du modèle (axe de définition des poutres en violet)

Le modèle CHAMOA prend plutôt le parti de modéliser les poutres à partir de l'axe neutre, en prolongeant le piedroit jusqu'en pied de radier.

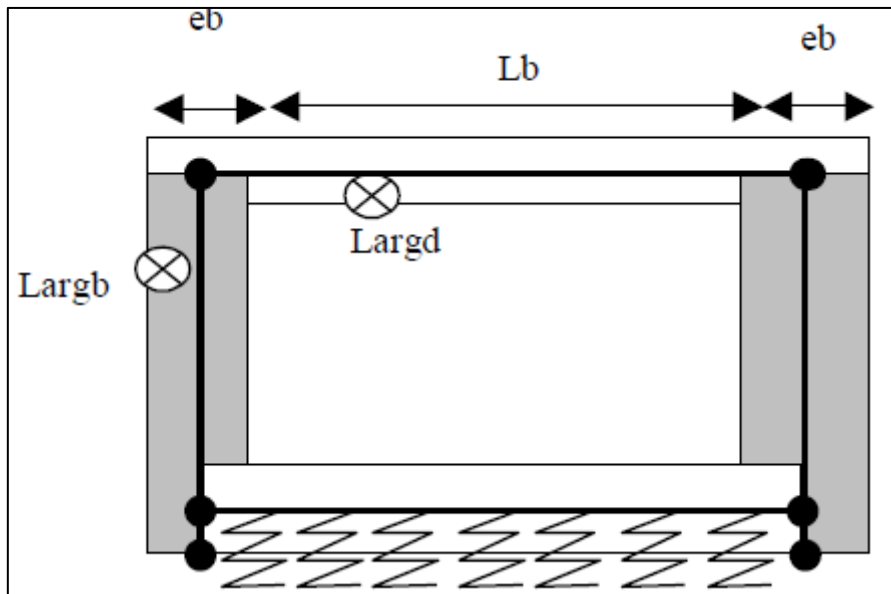


Figure 25 : Modélisation d'un cadre dans le modèle CHAMOA

Pour comparer ces deux approches, on regarde l'effet d'une charge de 100 kN/m sur la traverse entre deux modèles :

- Modèle 1 : Modèle retenu du programme de calcul (Figure 24) - Axe de définition sur l'extrados du cadre
- Modèle 2 : Modèle témoin - Même géométrie que le modèle 1 mais avec axe de définition des piedroits sur l'axe neutre

On remarque que l'approche 1 est plus défavorable avec des moments toujours supérieurs au modèle 1 en valeur absolue, ce qui est logique car les moments ne sont pas regardés au même endroit.

A mi-Travée, les moments sont assez proches (3% d'erreur par rapport au modèle 2).

En coin de portique, l'écart est plus grand (26%), mais il faut ici comparer les moments au nu de l'appui pour être le plus pertinent. Au nu, l'écart reste en dessous de 10 % (environ 7% d'erreur)

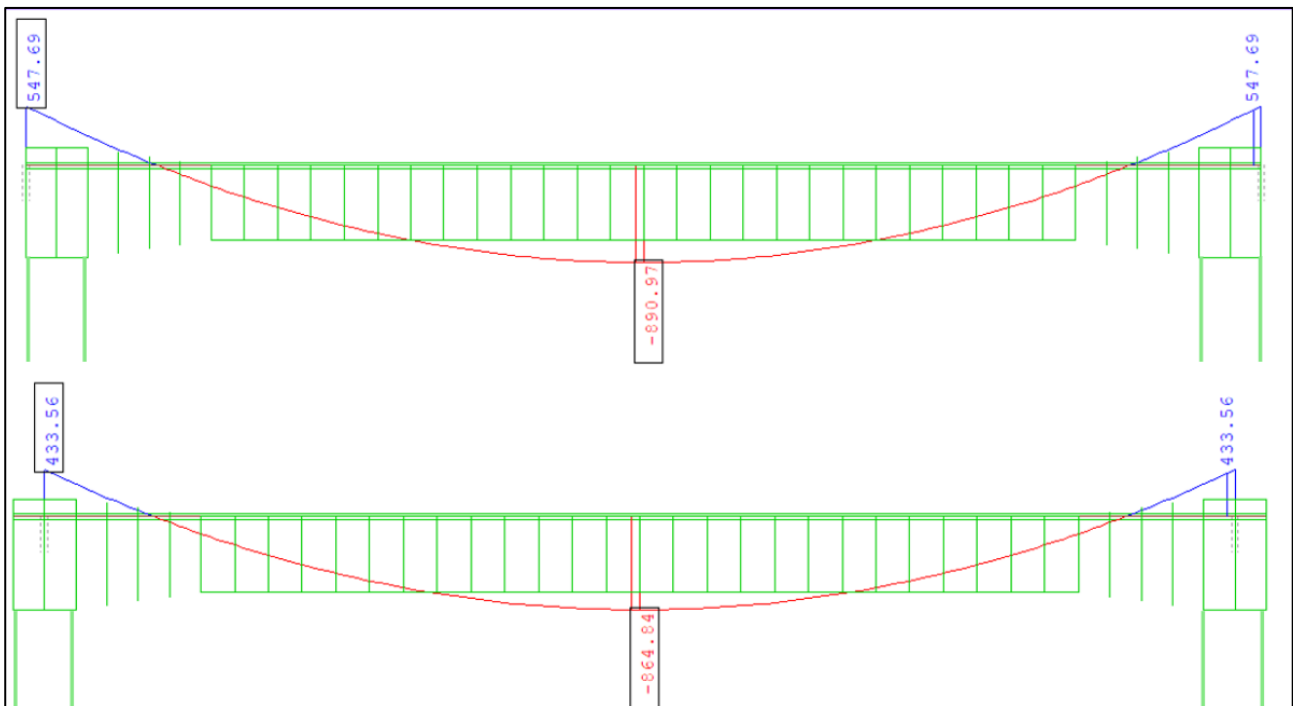


Figure 26 : Moment sous chargement uniforme (Modèle 1 en haut - Modèle 2 en bas)

La comparaison avec l'effort normal et l'effort tranchant a également été faite, et les résultats sont en annexe 1. Les conclusions sont les mêmes que pour le moment : L'approche choisie est légèrement défavorable (mais sécuritaire) en comparaison avec une modélisation plus classique depuis l'axe neutre.

4.2.4 Maillage

Le maillage est fait automatiquement par SOFISTIK. En 2D, l'utilisateur peut rentrer la densité de maillage qu'il souhaite (Il est conseillé d'avoir un maillage au minimum de l'ordre de l'épaisseur des éléments modélisés)

```

$-----/!\Précision du modèle/!\-----
$
$
$

STO#maillage 0.3    $[m]Densité du maillage
STO#nboucle 20     $[-]Nombre de pas à calculer pour les charges TS
    
```

Figure 27 : Paramètres jouant sur la précision du modèle

4.3 Charges statiques

4.3.1 Poids propre

Le poids propre de la structure est calculé par le biais d'une accélération nodale en tout point du modèle de 10 m.s^{-2} pour simuler la pesanteur terrestre.

Le cadre est en béton armé donc le poids volumique des éléments est de 25 kN.m^3

4.3.2 Superstructures

Chaque superstructure est pondérée par un coefficient majorant et minorant qui prend en compte les incertitudes liées au poids de ces éléments.

Il faudrait donc théoriquement créer deux cas de charge par superstructure (un cas majoré et un cas minoré). Il faudrait choisir ensuite pour chaque superstructure quel coefficient prendre pour être le plus défavorable sur l'effort qui nous intéresse.

Ici, les charges sont appliquées sur une même longueur, leurs efforts sont donc concomitants. On se contente donc de créer un poids linéaire global majoré (somme des poids linéaires pondérés par leur coefficient majorant) et un poids linéaire global minoré (somme des poids linéaires pondérés par le coefficient minorant)

4.3.3 Poussée des terres - Remblais techniques

La poussée des terres est modélisée par une force linéique triangulaire appliquée sur tout le piedroit de l'ouvrage. Un coefficient $\frac{1}{\sin(\varphi)}$ est appliqué pour tenir compte de l'effet biais (La poussée des terres est appliquée selon la largeur biaisée) avec φ le biais de l'ouvrage. Voir §4.2.1. Deux cas de charges sont créés selon la pondération du coefficient K.

Le modèle tient également compte de la hauteur de remblais éventuel qui peut se trouver sur la traverse. Ainsi la pression en tête de piedroit n'est notamment plus égale à 0 mais à $K \cdot \gamma \cdot h_{remblais} \cdot \frac{1}{\sin(\varphi)}$

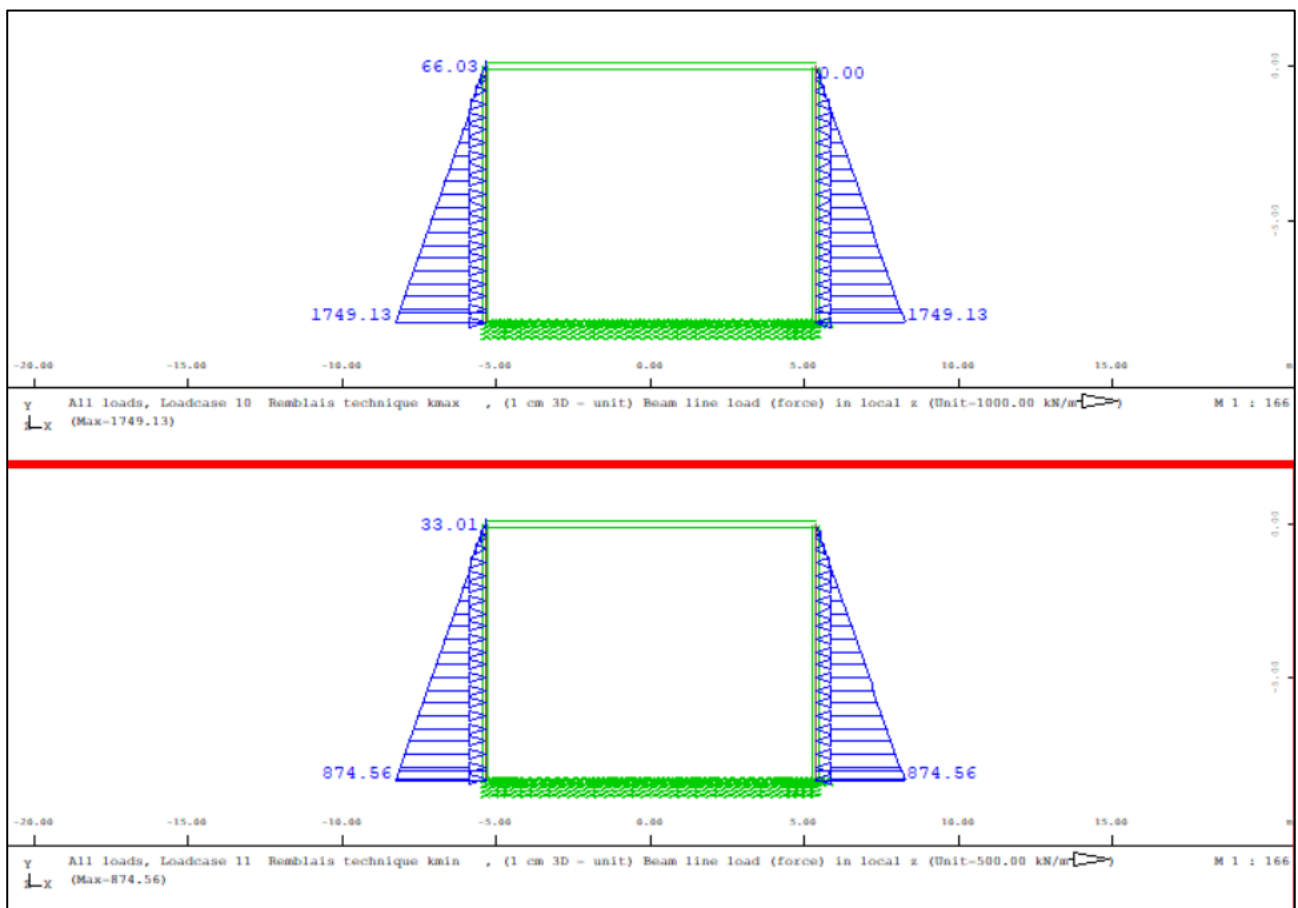


Figure 28 : Capture d'écran SODISTIK Graphic - Exemple d'application des charges des remblais techniques multipliées par K_{max} en haut et K_{min} en bas

4.4 Charges routières

4.4.1 Charges UDL sur traverse

Pour modéliser les charges UDL sur la traverse deux listes sont créées en fonction des caractéristiques de la chaussée (Largeur roulable, trottoirs, bermes, et talus) :

- Liste #LVOIE : Stocke les largeurs des voie 1, voie 2, voie 3 etc.
- Liste #UDL : Stocke les charges UDL surfaciques des voie 1, voie 2, voie 3 etc.

Ainsi le $i^{\text{ème}}$ élément de la liste correspond à la caractéristique de la $i^{\text{ème}}$ voie de circulation au sens de l'Eurocode.

Les charges linéiques de chaque voie sont calculées (*Charge surfaciques* \times *Largeur de la voie*), sont sommées entre elles, puis appliquées sur la longueur de l'ouvrage (sans oublier les charges de trottoirs et charges résiduelles)

Par exemple, Dans l'hypothèse où

- L'ouvrage est de classe 1
- La longueur de chaussée est de 14m
- Deux trottoirs de 2.77 m sont situés de part et d'autre de la chaussée
- Il n'y a pas de berme ni de talus

Alors en notant UDL la charge surfacique à appliquer sur l'ouvrage :

$$UDL = q_1 \alpha_{q1} l_1 + q_2 \alpha_{q2} l_2 + q_3 \alpha_{q3} l_3 + q_4 \alpha_{q4} l_4 + q_{resid} \alpha_{q,resid} l_{resid} + 2q_{trott} \alpha_{q,trott} l_{trott}$$

$$UDL = 1 \times 9 \times 3 + 1.2 \times 2.5 \times 3 + 1.2 \times 2.5 \times 3 + 1.2 \times 2.5 \times 3 + 1.2 \times 2.5 \times 2 + 2 \times 0 \times 1.2 \times 2.77$$

$$\text{Donc } UDL = 60 \text{ kN/ml}$$

On applique alors cette charge surfacique sur toute la traverse.

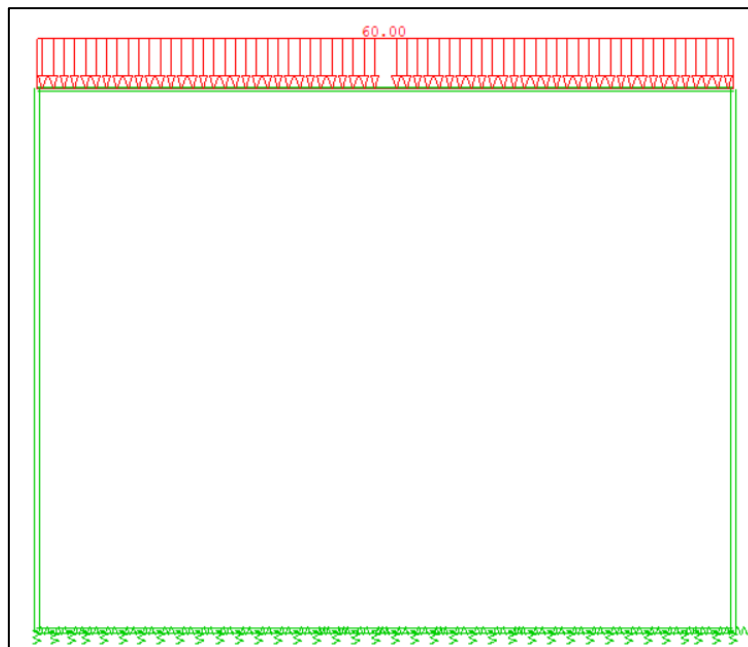


Figure 29 : Capture d'écran SOFISTIK Graphic - Exemple d'application des charges UDL

Remarque : On peut directement sommer les charges UDL des différentes voies grâce à la concomitance des effets linéiques en 2D

4.4.2 Charges TS sur traverse

Pour modéliser les charges TS sur la traverse une liste est créée en fonction des caractéristiques de la chaussée (Largeur roulable, trottoirs, bermes, et talus) :

- Liste #TS : Stocke les charges TS des voie 1, voie 2, voie 3 etc.

Ainsi le $i^{\text{ème}}$ élément de la liste correspond à la caractéristique de la $i^{\text{ème}}$ voie de circulation au sens de l'Eurocode.

Les charges TS de chaque voie sont calculées sont sommées entre elles, puis un convoi de deux essieux est créé. Il parcourt alors la traverse en un nombre régulier de pas (paramétré par l'utilisateur).

Si l'on reprend l'exemple du §4.4 avec les mêmes hypothèses, et en notant TS le poids d'une roue :

$$TS = Q_1\alpha_{Q1} + Q_2\alpha_{Q2} + Q_3\alpha_{Q3} + Q_4\alpha_{Q4}$$

$$TS = 300 \times 1 + 200 \times 1 + 100 \times 1 + 0 \times 1$$

Donc $TS = 600 \text{ kN}$

Cette charge est appliquée (2 fois par essieu) sur une largeur de 40 cm (Largeur d'une roue selon donnée par l'EC). La longueur finale d'application de la charge prend en compte le phénomène de diffusion des charges jusqu'à la demi-épaisseur de dalle. (Voir Figure 30 : Principe de diffusion).

Chaque couche diffuse les charges selon un angle de diffusion propre au matériau. La longueur finale de diffusion dépend donc de l'épaisseur et de l'angle de diffusion de chaque couche.

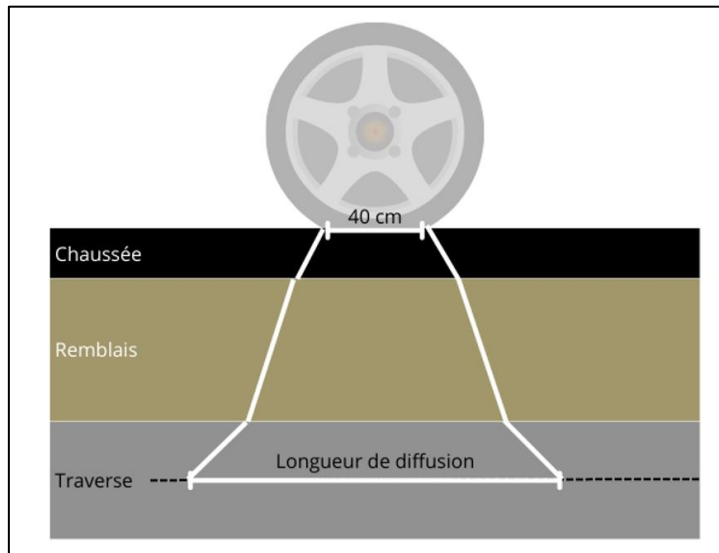


Figure 30 : Principe de diffusion

Dans notre exemple, Si l'on étudie un ouvrage avec les caractéristiques suivantes :

- Chaussée : hauteur $h_{chaussée} = 8 \text{ cm}$ et angle de diffusion $\varphi_{diff,chaussée} = 45^\circ$
- Remblais : Pas de couche de remblais
- Traverse : hauteur $h_{traverse} = 64.5 \text{ cm}$ et angle de diffusion $\varphi_{diff,traverse} = 45^\circ$

Alors la longueur de diffusion l_{diff} vaut :

$$l_{diff} = 0.4 + 2 \times h_{chaussée} \times \tan(\varphi_{diff,chaussée}) + 2 \times h_{remblais} \times \tan(\varphi_{diff,remblais}) + 2 \times h_{traverse} \times \tan(\varphi_{diff,traverse}) \div 2$$

$$l_{diff} = 0.4 + 2 \times 0.08 \times \tan(45^\circ) + 2 \times 0 \times \tan(30^\circ) + 2 \times 0.645 \times \tan(45^\circ) \div 2$$

Donc $l_{diff} = 1.205 \text{ m}$

Pour un essieu on applique $2 \times 600 \text{ kN}$ sur 1.205 m (Soit une charge surfacique de 995.86 kN/m sur 1.205m)

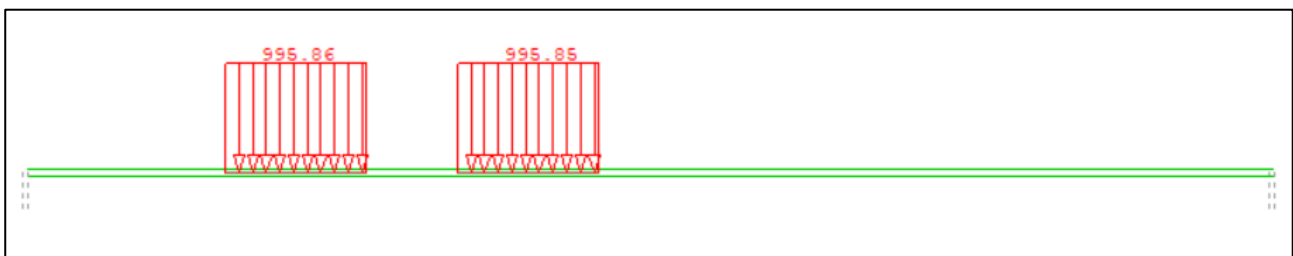


Figure 31 : Capture d'écran SODISTIK Graphic - Exemple d'application des charges TS

On remarque que :

- Les longueurs de diffusion peuvent être suffisamment grandes pour se superposer, notamment si la traverse est remblayée.

- Plusieurs cas de charges doivent être créés pour représenter la totalité des positionnements des charges possibles

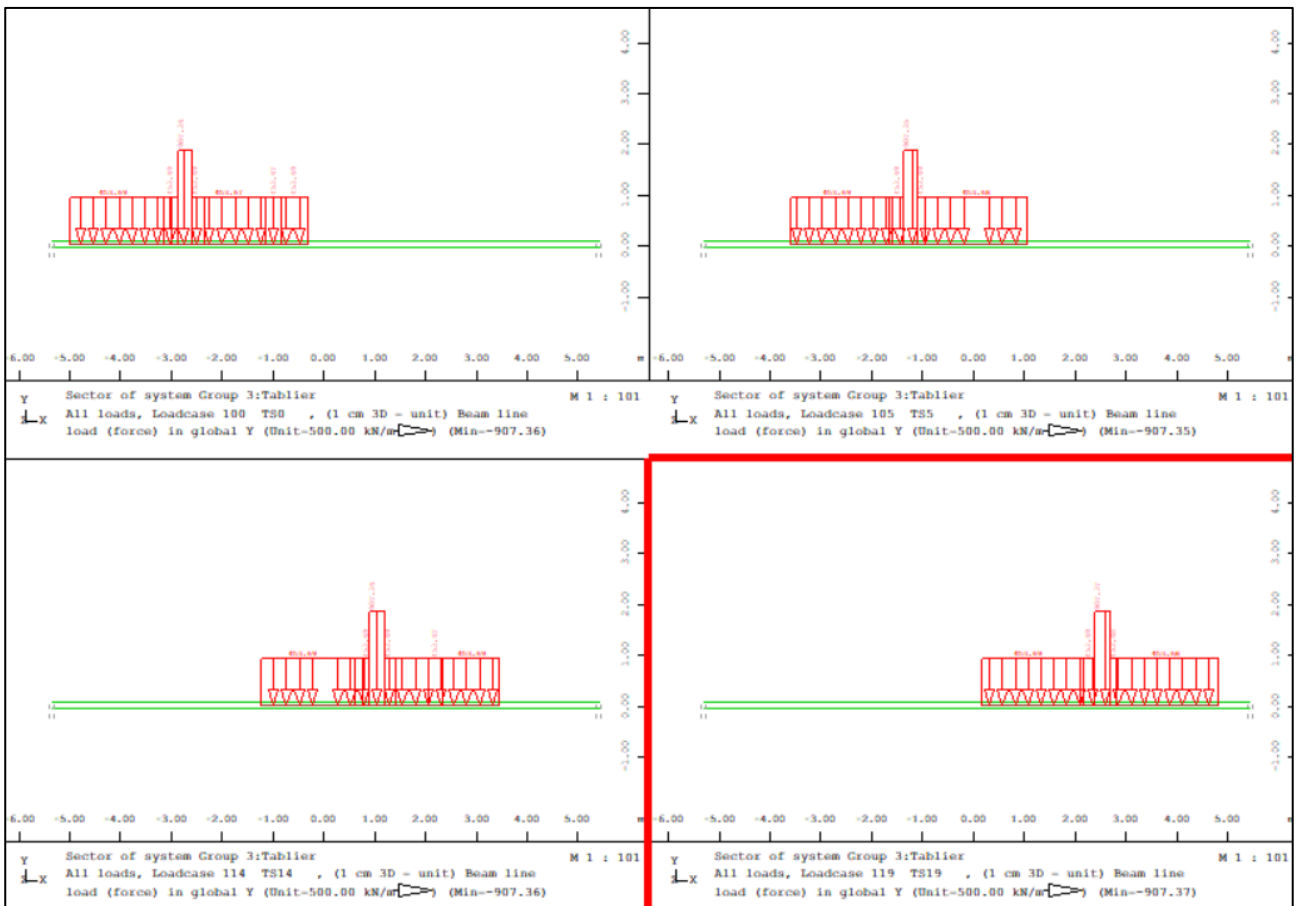


Figure 32 : Quatre exemples de cas de charges TS

Remarque : On peut directement sommer les charges TS des différentes voies grâce à la concomitance des effets linéiques en 2D. Il n'y a donc pas besoin de réitérer l'opération pour chaque voie.

4.4.3 Charges mobiles sur remblais

Pour les Charges UDL sur remblais, on se contente d'appliquer la charge surfacique UDL calculée au §4.4 réduite de 30% et multipliée par le coefficient moyen des terres (Voir §2.3.8)

Pour les charges TS sur remblais, on applique la charge TS calculée au §4.4.2 sur une longueur de 1.2 m. De même, la charge est réduite de 30% et multipliée par le coefficient moyen des terres (Voir §2.3.8)

Le calcul de la somme de toutes les charges sur remblais n'est pas forcément très juste. Dans l'idéal, il faudrait suivre la démarche CHAMOA et faire une répartition de type Guyon Massonnet

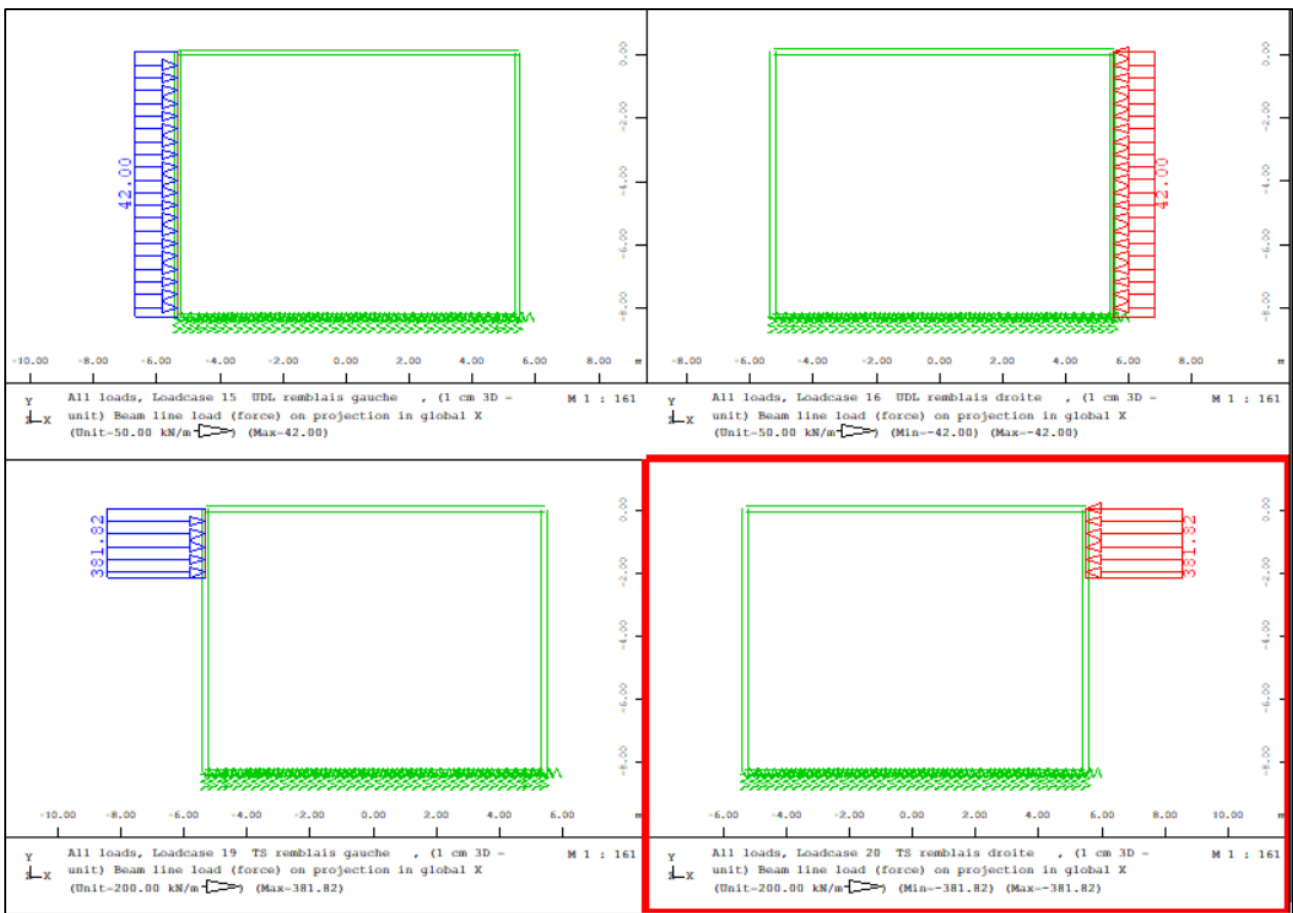


Figure 33 : En haut : Charges UDL sur remblais côté gauche et droit- En haut : Charges TS sur remblais côté gauche et droit

On remarque que les charges sur remblais (TS et UDL) sont divisées en deux cas de charges : remblai gauche ou remblai droite. Dans les combinaisons, il est important de correctement additionner les cas :

- Pour les charges TS, on comptabilise le côté gauche **ou** le côté droit (les efforts étant plus ou moins antagonistes, il est important de pouvoir séparer ces deux cas).
- Pour les charges UDL, on comptabilise le côté gauche **et** le côté droit. Il serait trop défavorable de ne considérer qu'un seul des cas. L'Eurocode ne prévoit pas la possibilité de ne pas appliquer la charge UDL sur un seul remblai.

De plus le §3.2.2 du guide CHAMOA précise que « Du fait que la rigidité de réaction sur les piédroits des remblais n'est pas prise en compte, on obtient une dissymétrie exagérée des efforts dans l'ouvrage pour les cas de charges dissymétriques des charges mobiles. »

Ainsi, pour conserver l'idée du blocage en déplacement de la traverse pour les charges d'exploitation, on place un appui articulé en tête de piédroits qui ne s'active que pour les charges mobiles sur remblais.

Remarque : J'ai rencontré quelques difficultés à représenter les charges sur Remblais sur SOFISTIK. Le guide CHAMOA était en effet peu explicite sur le sujet. J'avais commencé à recalculer les charges en prenant une charge UDL infinie et une charge TS au nu de la traverse qui se diffuse à 30° dans le remblai. Ce n'est qu'après un retour d'expérience avec mon encadrant que j'ai appris que l'usage était de faire selon la méthode simplifiée détaillée ci-dessus.

4.5 Charges thermiques et retrait infini

Les charges thermiques peuvent facilement être définies dans SOFISTIK à l'aide de la commande suivante :

DT	Uniform temperature difference	K
DTY	Temperature difference in local y-direction	K
DTZ	Temperature difference in local z-direction	K

Figure 34 : Extrait du manuel SOFISTIK [8]

Le repère local est orienté de façon que les directions X et Z soient dans le plan, on utilise donc la commande DTZ pour modéliser le gradient thermique.

Les charges thermiques sont appliquées **uniquement sur la traverse**.

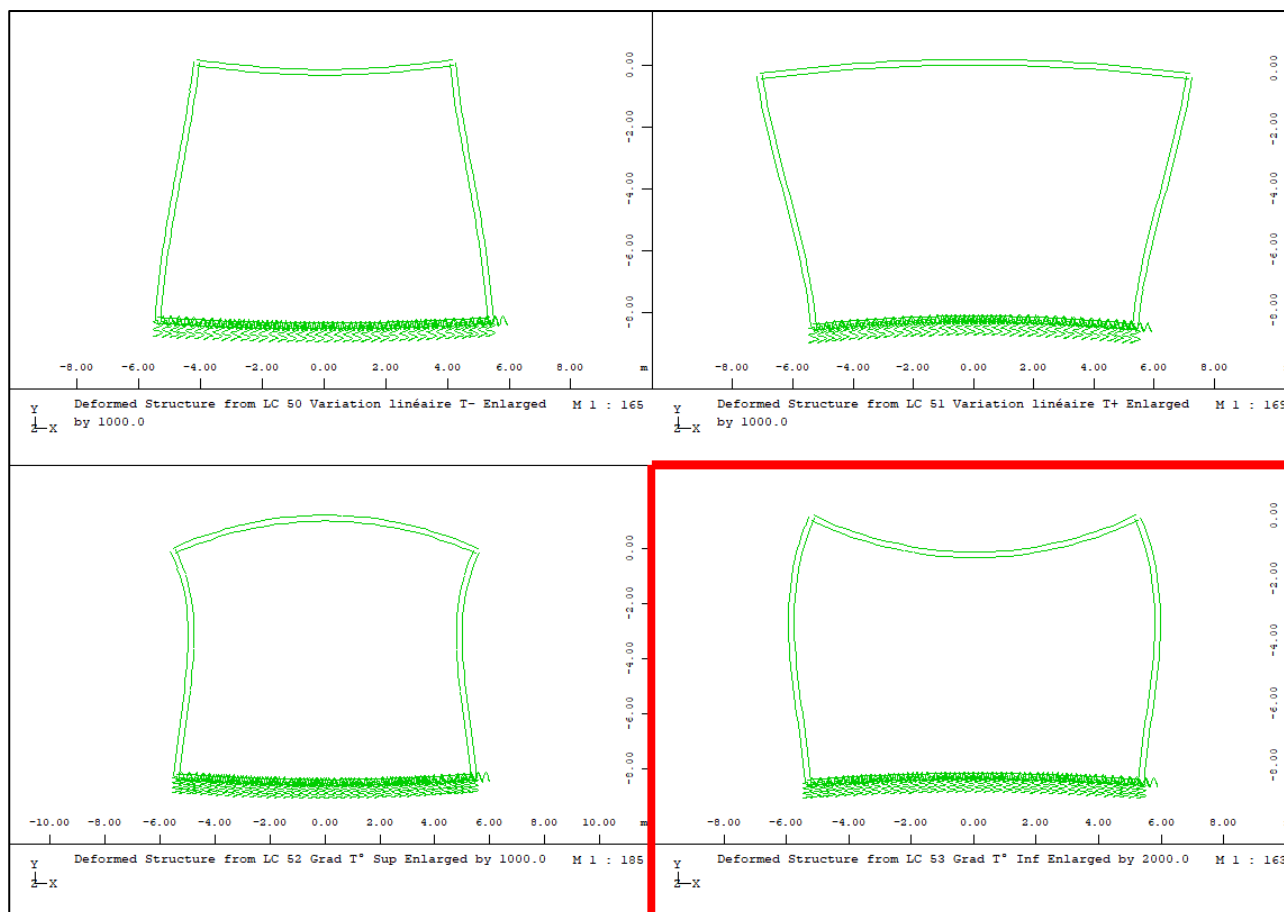


Figure 35 : De gauche à droite, Déformé sous variation linéaire négative, variation linéaire positive, gradient thermique positif, gradient thermique négatif

Pour le retrait infini, on applique directement la déformation sur la traverse en donnant la valeur de retrait calculée.

Remarque : Dans un premier temps, j'ai commencé à programmer un calcul du retrait du béton automatisé en fonction des paramètres du matériau. C'était assez complexe car le calcul nécessite en particulier de la lecture graphique, et c'est donc difficilement implantable dans le code.

Après une réunion avec mon encadrant, nous avons conclu qu'il était plus simple de laisser l'utilisateur rentrer la valeur de la déformation. Cela laisse plus de contrôle à l'ingénieur et donne moins l'impression que le programme soit une « boîte noire » qui fait des calculs sur lesquels l'utilisateur n'a aucun contrôle.

4.6 Combinaisons

Dans SOFISTIK, chaque cas de charge est affecté à une action définie en amont. Les coefficients d'actions (noté psi dans l'EC) qui sont appliqués pour chaque état de service, sont définis lors de la définition de l'action.

HEAD	Catégories de charges															
ACT	G	GAMU	1.35	1	PSI0	1	PSI1	1	PSI2	1	PART	'G'	SUP	PERM	TITL	"Poids propre"
ACT	G_1	GAMU	1.35	1	PSI0	1	PSI1	1	PSI2	1	PART	'G'	SUP	PERM	TITL	"Superstructures"
ACT	R	GAMU	1.35	1	PSI0	1	PSI1	1	PSI2	1	PART	'G'	SUP	PERM	TITL	"Poids des terres"
ACT	L_U	GAMU	1.35	0	PSI0	0.4	PSI1	0.4	PSI2	0	PART	'Q'	SUP	COND	TITL	"UDL"
ACT	L_T	GAMU	1.35	0	PSI0	0.75	PSI1	0.75	PSI2	0	PART	'Q'	SUP	EXCL	TITL	"TS"
ACT	T												SUP	EXCL		

Figure 36 : Définition des actions pour le modèle 2D

La commande SUP permet de décrire le calcul de superposition qu'applique le programme :

- PERM : Charge permanente – Applique toutes les charges contenues dans l'action
- COND : Charge variable – Applique les charges qui sont défavorables
- EXCL : Charges variables – Applique la charge la plus défavorable

Par exemple ici, toutes les positions possibles des charges TS sont catégorisées dans L_T. Lors des calculs enveloppes, le logiciel prend automatiquement la position la plus défavorable du TS pour l'effet demandé.

4.7 Ferrailage

SOFISTIK permet de rapidement dimensionner le ferrailage à mettre en œuvre. Pour cela, le programme donne 3 résultats en fonction de la combinaison de calcul.

- Dimensionnement du ferrailage ELU
- Dimensionnement du ferrailage ELS Fréquent avec une ouverture de fissure minimum 0.3 mm
- Dimensionnement du ferrailage ELS Caractéristique

5. Modélisation 3D – Modèle à coque

Le modèle 3D est un modèle coque, c'est-à-dire que ce sont des éléments qui travaillent en flexion et en membrane. Il est donc adapté à tous les types d'ouvrage PICF (Le biais est représenté comme dans la réalité).

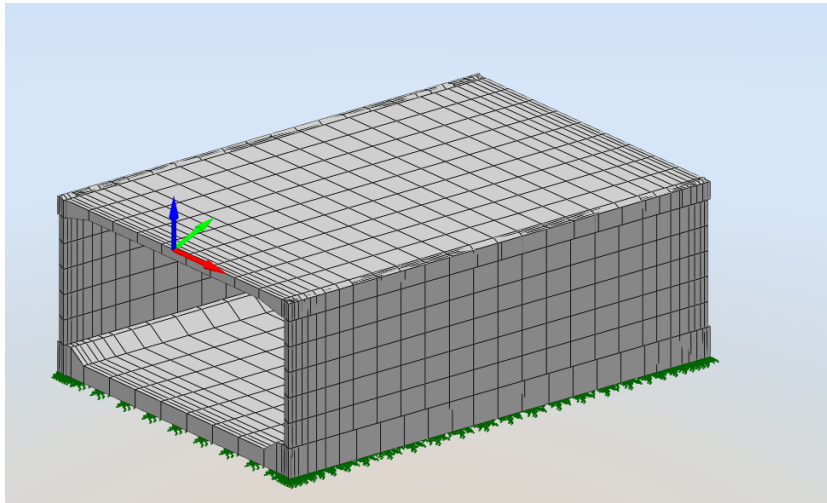


Figure 37 : Capture d'écran du modèle 3D pour un PICF donné

Le rajout d'une nouvelle dimension de modélisation alourdit grandement les calculs et donc l'utilisation du modèle 3D est préconisée lorsque le modèle 2D ne donne pas de résultats satisfaisants.

L'utilisation de ce modèle est donc recommandée lorsque :

- L'ouvrage présente un fort biais
- L'ouvrage est assez large

5.1 Géométrie

5.1.1 Construction du modèle

Les nœuds du modèle sont situés le long des deux ouvertures, suivants la géométrie réelle, à partir des données d'entrées. Ils sont la simple translation du modèle plan selon une largeur droite et un angle biais. Là où dans le modèle précédent, deux nœuds étaient reliés par une droite, ici les deux nœuds et leur translation forment une plaque en forme de parallélogramme d'épaisseur réelle.

5.1.2 Axe de définition des plaques

La définition des plaques est assez similaire au modèle 2D. La plaque génératrice est située sur l'extrados du volume

5.1.3 Maillage

Le maillage est réalisé automatiquement par SOFISTIK. Quatre options sont possibles pour l'utilisateur :

MCTL	Meshing control
	AUTO Automatic meshing
	REGM Regular Mesh if possible
	SNGQ Mesh as single quad
	OFF Deactivate meshing

Figure 38 : Extrait du manuel SOFISTIK [8]

- AUTO : Maillage automatique
- REGM : Maillage régulier (Forme rectangulaires/parallélogrammes)

- SNGQ : Maillage unique (Déconseillé pour le modèle)
- OFF : Pas de maillage (Déconseillé pour le modèle)

L'utilisateur donne également la densité de maillage souhaité (Il est conseillé d'avoir un maillage au minimum de l'ordre de l'épaisseur des éléments modélisés).

5.2 Charges statiques

Les charges sont appliquées sur la géométrie réelle avec prise en compte du biais :

- Le poids propre est modélisé par une accélération $g = 10 \text{ m/s}^{-2}$ de la structure
- Les superstructures sont appliquées à leur position réelle. Deux cas de charges par superstructures sont calculés (avec coefficient majorant ou minorant)
- Les poids des terres sont appliqués **perpendiculaires** aux piédroits.

5.3 Charges routières sur traverse

La plus grande difficulté pour la construction du modèle 3D consiste à représenter les charges routières. En effet, il n'y a pas de concomitance des efforts des charges routières en 3D et donc il n'est pas possible de représenter les charges aussi simplement que pour le modèle 2D.

Il faut notamment représenter dans le modèle l'intégralité des possibilités de placement de voie et de charge TS prévus par l'EC.

5.3.1 Etude des 4 cas de configuration de la chaussée

L'Eurocode 2 prévoit la possibilité d'organiser la chaussée selon différents arrangements possibles de voies, qui doivent être couverts par l'étude, selon où l'aire résiduelle est placée.

Ce type d'arrangement de chaussée est nommé dans la suite de ce document : cas de configuration

On limite l'étude à quatre cas réels étudiés :

- Cas 1 : Aire résiduelle également répartie sur les côtés
- Cas 2 : Aire résiduelle complètement à gauche
- Cas 3 : Aire résiduelle complètement à droite
- Cas 4 : Voie résiduelle en tant que terreplein central



Figure 39 : Cas de positionnement de 1 à 4 de gauche à droite

Remarque : Avec le recul, je me suis aperçu que cette hypothèse ne couvre pas tous les cas réels.

Si le nombre de voie est pair, alors le programme place arbitrairement le terreplein central à gauche. Ceci entraîne une dysmétrie des surcharges qui est artificielle. Il faut donc au choix ajouter un cas de positionnement à l'étude ou ne considérer que la moitié de l'ouvrage la plus sollicitée et appliquer le principe de symétrie pour l'autre moitié.

5.3.2 Permutation des voies

Une fois la configuration de la chaussée fixée, l'emplacement des voies est connu. D'après l'Eurocode 0, les voies sont différenciées et n'ont pas les mêmes applications de charges. Il faut donc étudier les différentes possibilités d'arrangement pour s'assurer d'étudier tous les cas possibles. Par exemple, dans le cas où il y a 3 voies, pour 3 emplacements il y a 6 possibilités de répartition. (Voir Figure 40).

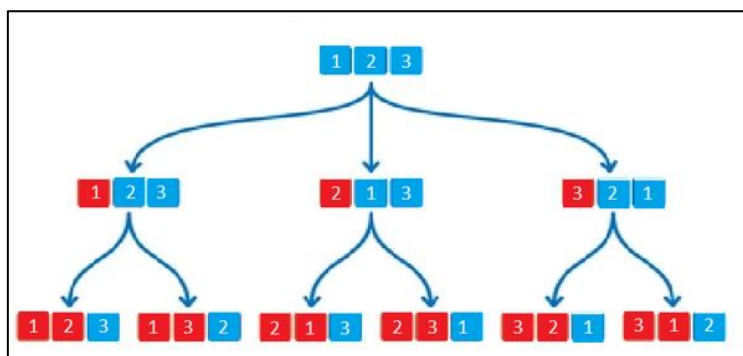


Figure 40 : Principe des permutations

De manière générale, pour n voies, il y a $n!$ permutations car ce sont des éléments différenciés* sans répétitions dont l'ordre de rangement est important.

Ainsi, pour un nombre n de voie donnée, une liste des listes contenant la totalité des permutations possible est créée sur le même principe que la Figure 40. Chaque permutation peut donc être repérée par sa position dans la liste.

Dans les faits le programme n'intègre pas d'algorithme de permutation, car le langage de programmation propre à SOFISTIK ne le permet pas facilement. Les listes sont stockées dans le fichier de commande et ont été écrites par un programme tiers. Le modèle ne prévoit alors pas la possibilité de calculer des résultats pour une chaussée de plus de 4 voies.

Remarque : *L'hypothèse des éléments différenciés n'est vraie que pour 4 voies ou moins (§2.3.7). Au-delà l'Eurocode ne fait plus de distinction entre les voies 4 ou plus. Il y a donc possibilité de théoriquement réduire le nombre de permutations réellement possibles dans ce cas-là.

5.3.3 Nécessité de créer une logique de dénomination des cas

SOFISTIK Fonctionne par un système LC (Load Case = Cas de charge). Il attribue à chaque cas de charge mais aussi à chaque enveloppe de cas de charge un LC défini par le programme. On peut alors en se plaçant sur ce LC, observer les effets des charges associées à ce LC (déformations, efforts). Les numéros d'attribution possibles permis par SOFISTIK sont très grands mais restent limités (999999 LC maximums !).

Remarque : En 3D, à cause de la multiplication des positions possibles des TS, je me suis rendu compte qu'il est indispensable d'adopter une logique dans le numéro d'attribution des LC. J'ai donc décomposé le numéro d'attribution en groupes de chiffres qui donnent une indication sur le LC qu'il héberge

5.3.4 Charges UDL sur traverse

Pour identifier facilement les cas de charges LM1, leurs numéros d'attribution à un LC sont reliés à leur caractéristique. Ce système permet de s'assurer que les cas ne se chevauchent pas tout en améliorant leur lisibilité (§5.3.3).

Une unique charge UDL correspond à un cas de positionnement et à une permutation de voie.

$$\text{Dénomination LC UDL} : \underset{a}{2} \underset{b}{01} 0 00$$

- a : Configuration de la chaussée (de 1 à 4)
- b : Numéro de permutation de voie (de 0 à $n! - 1$ où n est le nombre de voies)

Par exemple, on suppose un ouvrage de classe 1, avec une chaussée de largeur 11m et deux trottoirs de 1 m chacun. On a donc 3 voies de 3 m à placer avec une aire résiduelle de 2m.

Pour le cas de charge 1 00 0 00, l'aire résiduelle est également répartie sur les côtés (configuration 1) et on est sur la permutation numéro 0 (C'est-à-dire que l'on a de gauche à droite : Trottoir gauche - ½ Aire résiduelle - Voie 1 - Voie 2 - Voie 3 - ½ Aire résiduelle - Trottoir droit).

Pour la voie 1, la charge surfacique est de 9 kN/m² et pour les autres voies : 3 kN/m². La charge à appliquer sur l'aire résiduelle est également de 3 kN/m². Les trottoirs ne sont pas chargés.

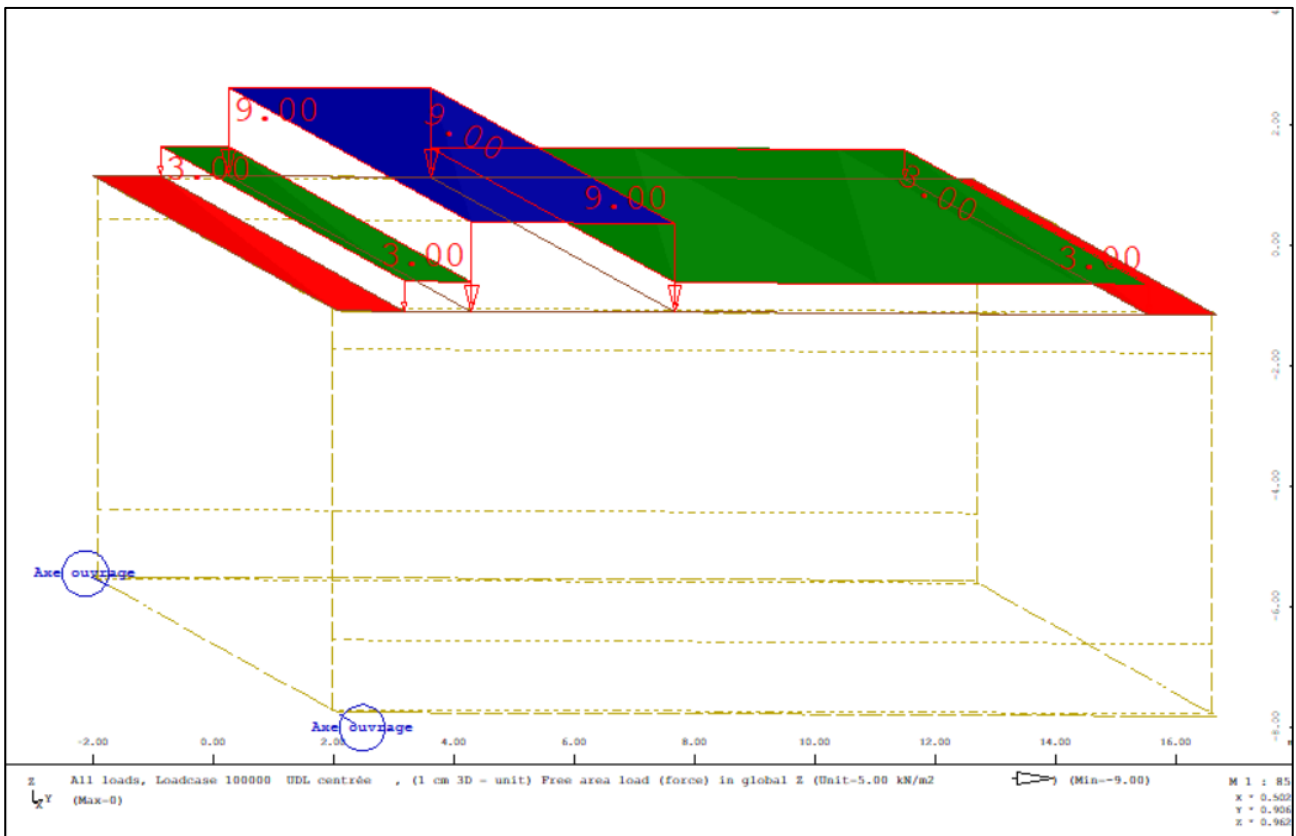


Figure 41 : Capture d'écran du cas de charge 1 00 0 00

5.3.5 Définition des convois TS

Un convoi TS est défini par deux essieux séparés de 1.2m. L'entraxe des roues d'un même essieu est de 2m.

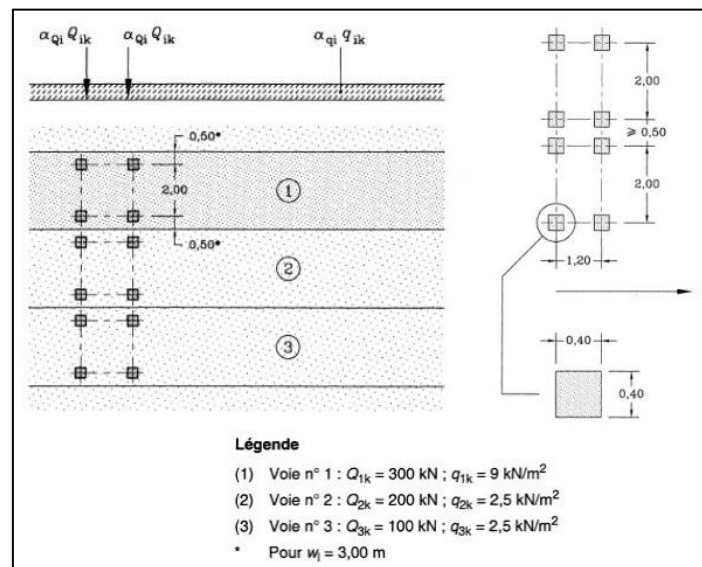


Figure 42 : Modèle LM1

Il faut bien s'assurer que les TS roulent sur leur voie (par exemple, Il n'est pas possible que le TS de 300 kN/m² roule sur la voie 3, il doit rouler sur la voie 1)

Les convois TS peuvent être définis directement dans SOFISTIK avec prise en compte de la diffusion comme pour le modèle 2D, ce qui permet dans le code de décrire facilement un cas de charge TS à partir de sa position sur la chaussée.

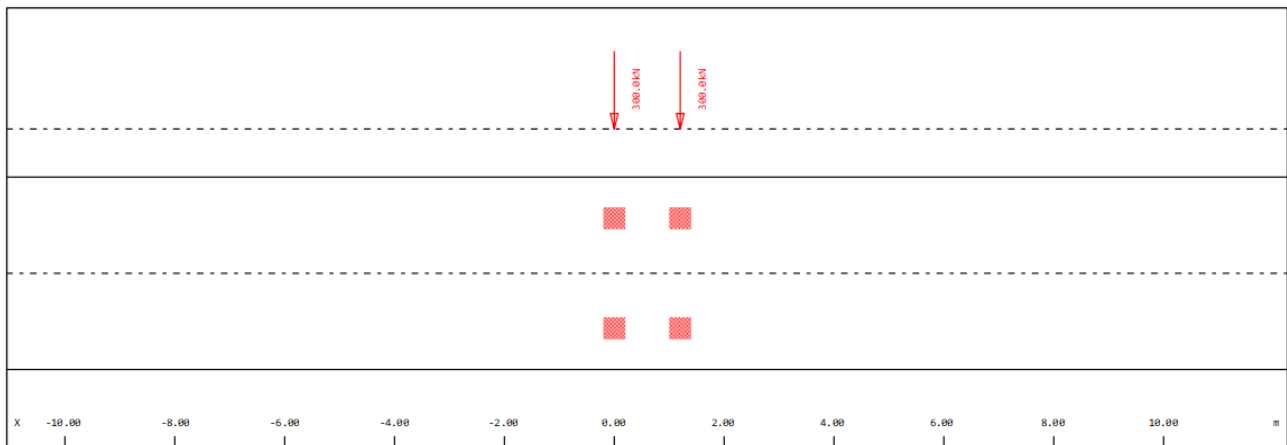


Figure 43 : Définition du convoi 1

La définition des convois 1,2, et 3 est donnée en annexe 4 à titre indicatif.

5.3.1 Chargement TS sur traverse

À positionnement de voie et permutation de voie fixés, il faut faire parcourir les tandems TS le long des voies. On suppose que les charges se déplacent au centre des voies. L'utilisateur peut préciser le nombre de pas nécessaire à la traversée du tandem via le paramètre #NB_BOUCLE.

Les charges TS se décomposent en plusieurs cas qui correspondent à chaque voie et chaque position longitudinale sur cette dernière

$$\text{Dénomination LC TS : } \underbrace{1}_a \underbrace{05}_b \underbrace{3}_c \underbrace{04}_d$$

- a : Configuration de la chaussée (de 1 à 4)
- b : Numéro de permutation de voie (de 0 à $n! - 1$ où n est le nombre de voies)
- c : Numéro de la voie sur laquelle roule le tandem (de 1 à n où n est le nombre de voies)
- d : Numéro du pas (de 0 à #NB_BOUCLE-1)

Par exemple, on suppose un ouvrage de classe 1, avec une chaussée de largeur 11m et deux trottoirs de 1 m chacun. On a donc 3 voies de 3 m à placer avec une aire résiduelle de 2m.

On regarde ici un positionnement de voie particulier qui correspond au LC 1 00 0 00 (on rappelle que l'on a de gauche à droite : Trottoir gauche - ½ Aire résiduelle - Voie 1 - Voie 2 - Voie 3 - ½ Aire résiduelle - Trottoir droit).

On affiche 3 positions possibles des TS des voies 1,2 et 3 (LC 1 00 1 01 - LC 1 00 2 03 - LC 1 00 3 00) à des pas de temps divers. On a bien chaque TS qui correspond à sa voie.

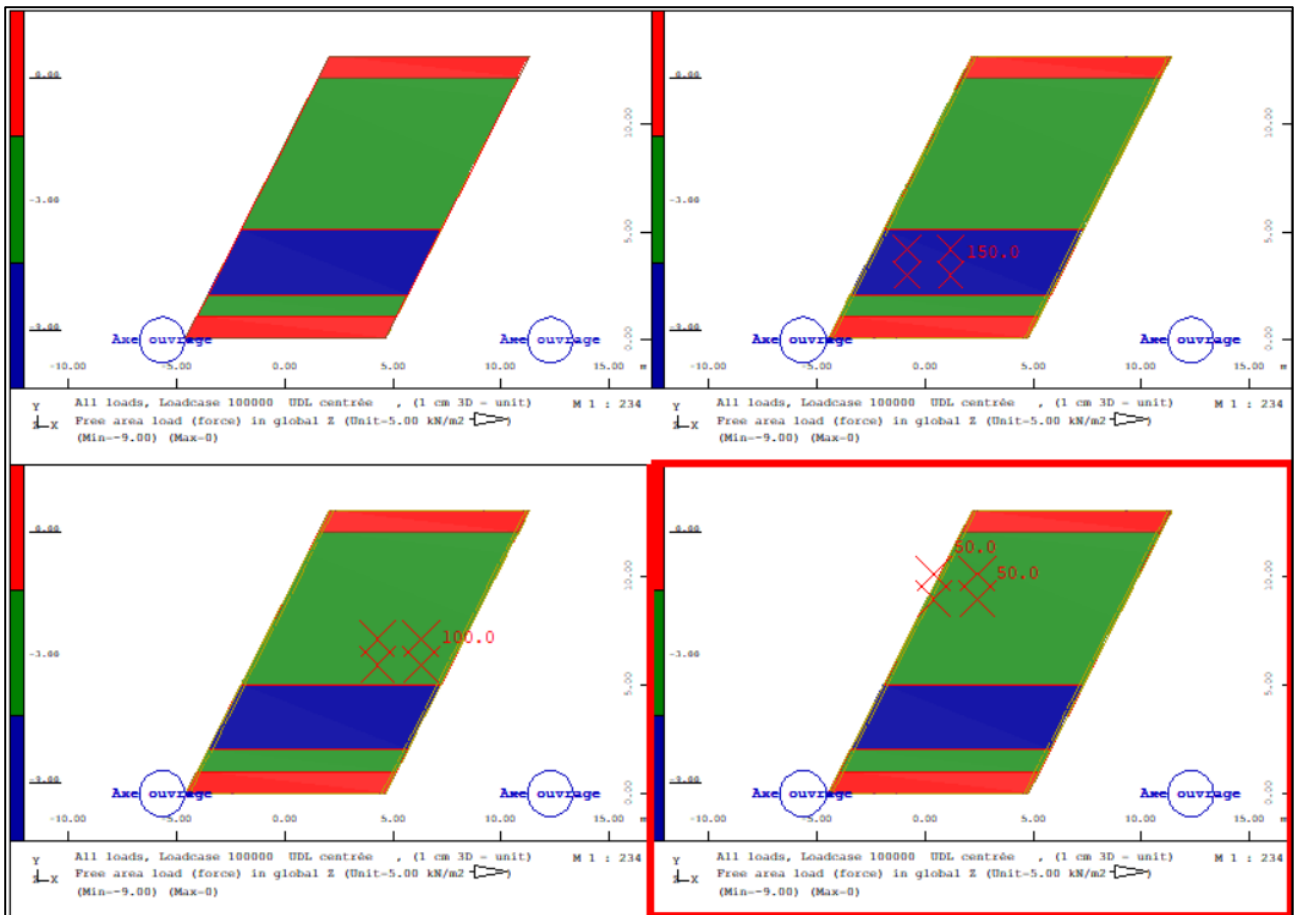


Figure 44 : Dans le sens de lecture - LC 1 00 0 00 - LC 1 00 1 01 - LC 1 00 2 03 - LC 1 00 3 00

Le nombre de LC des charges TS à calculer par le programme est très grand : il y a

$$4 \times n! \times n \times p \text{ nombre de cas}$$

- n Le nombre de voie
- p Le pas nécessaire à la traversée du tandem (paramètre #NB_BOUCLE)

Remarque : Si on reprend le cas de l'exemple précédent pour une chaussée à 3 voies, on se retrouve avec $72 \times p$ cas de charges. Le temps de calcul est donc assez long. Dans un premier temps, je pense qu'il faut donc lancer le calcul avec un pas faible pour avoir rapidement des résultats exploitables avant de demander des résultats plus précis.

5.3.2 Construction de l'algorithme

Pour construire ces LC, j'ai créé deux fonctions UDL et TS. Le principe est qu'à configuration et permutation de voie donnée, il faut appliquer la charges UDL correspondante, et les TS qui parcourent ces voies. Les fonctions prennent en arguments le numéro de configuration des voies. (#cdc) et le numéro de permutation (#n_perm) pour pouvoir correctement nommer les LC. Il faut ensuite construire 3 listes qui décrivent la situation :

Pour les charges UDL

- #L_i : Contient dans l'ordre les largeurs d'application des charges par voies
- #PS_i : Contient dans l'ordre les charges surfaciques à appliquer par voie

Pour les charges TS

- #L_i : Contient dans l'ordre les largeurs roulables par voies
- #PS_i : Contient dans l'ordre les charges des tandems par voie

La fonction UDL renvoie le LC correspondant à l'application des charges UDL

La fonction TS renvoie les LC correspondant aux positions des différents TS par voie

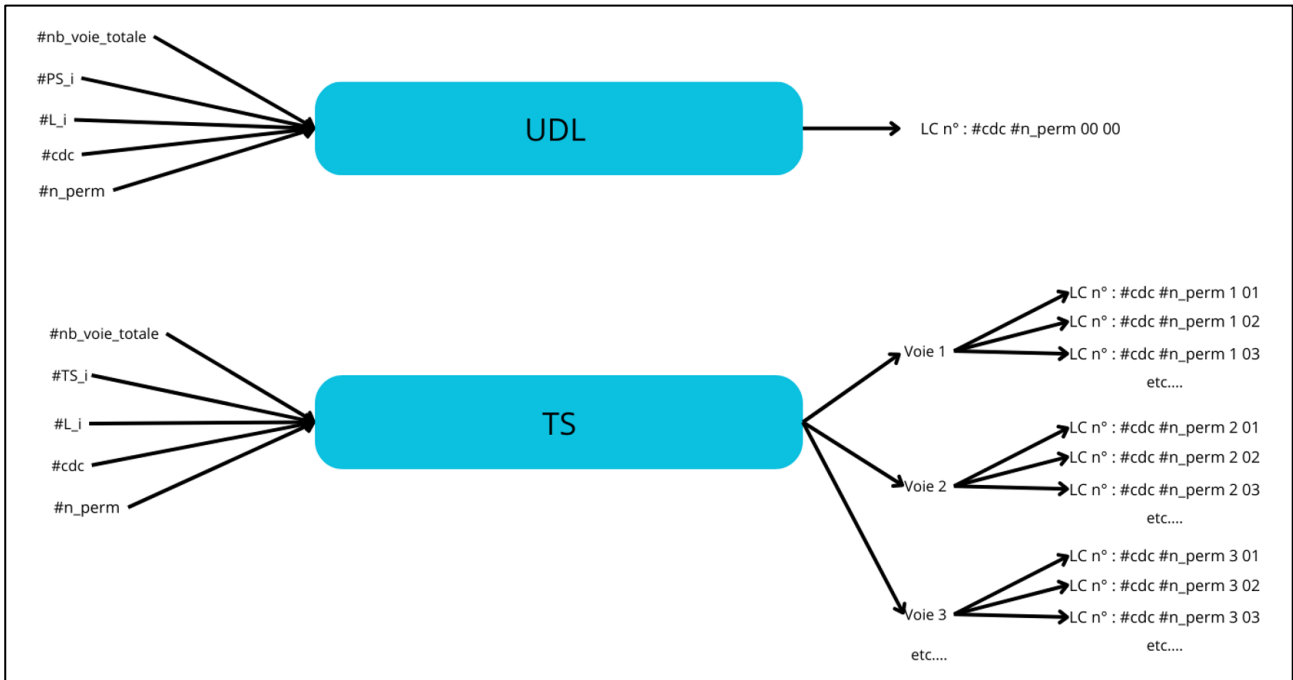


Figure 45 : Schéma du fonctionnement des fonctions UDL et TS

Maintenant, il faut explorer tous les cas possibles : J'étudie alternativement les quatre configurations de chaussée. Je parcours ensuite à l'aide d'une boucle les permutations possibles des voies.

Je connais alors la position et la numérotation des voies. Je construis ensuite les arguments de mes fonctions qui dépendent de la configuration et de la permutation des voies. J'applique enfin les fonctions UDL et TS qui me permettent de créer les LC

Configuration de la chaussée	Attribution des voies	Construction des arguments des fonctions UDL + TS	Application des fonctions UDL et TS
Configuration 1	Permutation 1 = Voie 1 - Voie 2 -Voie 3	→ #cdc = 1 ; #n_perm =1	UDL + TS
	Permutation 2 = Voie 1 - Voie 3 -Voie 2	→ #cdc = 1 ; #n_perm =2	UDL + TS
	Permutation 3 = Voie 2 - Voie 1-Voie 3	→ #cdc = 1 ; #n_perm =3	UDL + TS
	Permutation 4 = Voie 2 - Voie 3 -Voie 1	→ #cdc = 1 ; #n_perm =4	UDL + TS
	etc....	etc....	etc....
Configuration 2	Permutation 1 = Voie 1 - Voie 2 -Voie 3	→ #cdc = 1 ; #n_perm =1	UDL + TS
	Permutation 2 = Voie 1 - Voie 3 -Voie 2	→ #cdc = 1 ; #n_perm =2	UDL + TS
	Permutation 3 = Voie 2 - Voie 1-Voie 3	→ #cdc = 1 ; #n_perm =3	UDL + TS
	Permutation 4 = Voie 2 - Voie 3 -Voie 1	→ #cdc = 1 ; #n_perm =4	UDL + TS
	etc....	etc....	etc....
Configuration 3	Permutation 1 = Voie 1 - Voie 2 -Voie 3	→ #cdc = 1 ; #n_perm =1	UDL + TS
	Permutation 2 = Voie 1 - Voie 3 -Voie 2	→ #cdc = 1 ; #n_perm =2	UDL + TS
	Permutation 3 = Voie 2 - Voie 1-Voie 3	→ #cdc = 1 ; #n_perm =3	UDL + TS
	Permutation 4 = Voie 2 - Voie 3 -Voie 1	→ #cdc = 1 ; #n_perm =4	UDL + TS
	etc....	etc....	etc....
Configuration 4	Permutation 1 = Voie 1 - Voie 2 -Voie 3	→ #cdc = 1 ; #n_perm =1	UDL + TS
	Permutation 2 = Voie 1 - Voie 3 -Voie 2	→ #cdc = 1 ; #n_perm =2	UDL + TS
	Permutation 3 = Voie 2 - Voie 1-Voie 3	→ #cdc = 1 ; #n_perm =3	UDL + TS
	Permutation 4 = Voie 2 - Voie 3 -Voie 1	→ #cdc = 1 ; #n_perm =4	UDL + TS
	etc....	etc....	etc....

Figure 46 : Schéma du fonctionnement global de construction des LC

5.4 Charges routières sur remblais

La méthode d'application des charges LM1 se base sur le calcul global du §2.2 du Guide SETRA EC 0 et 1 [5]. On suppose qu'il n'y a pas de limite à la diffusion des charges (hypothèse raisonnable pour les ouvrages avec mur en aile ou mur suspendu)

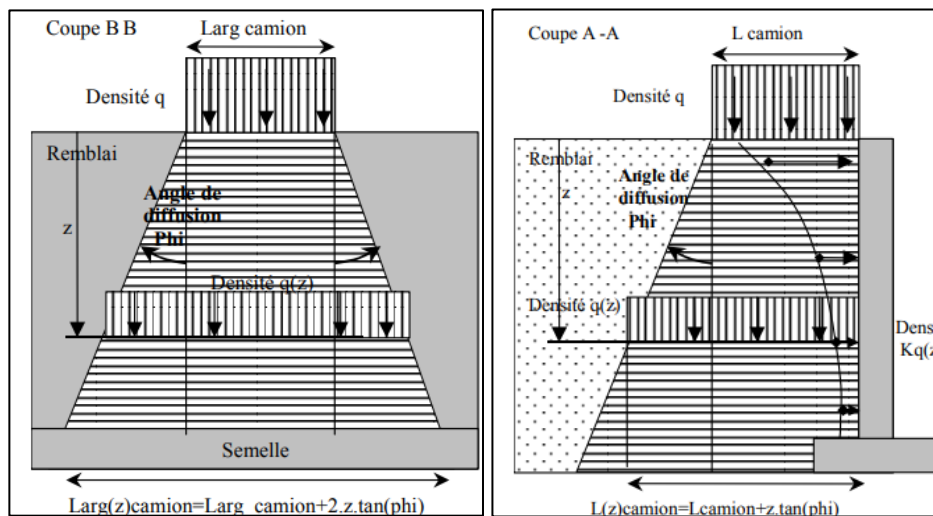


Figure 47 : Diffusion d'une voie dans le remblai à gauche, diffusion d'un impact dans le remblai à droite [5]

On applique la charge LM1 sur une largeur qui augmente avec la profondeur en fonction de diffusion des efforts dans le remblai (diffusion à 30°). Les charges sont également réduites de 30% et multipliées par le coefficient moyen des terres (Conformément au §2.3.8).

5.5 Combinaisons

5.5.1 Combinaisons intermédiaires

Pour s'assurer de prendre des combinaisons réelles, je crée des combinaisons intermédiaires qui correspondent à une configuration de chaussée et à une permutation de voie. Ces combinaisons s'expriment sous forme d'enveloppe.

Leur numéro d'attribution à un cas de charge est explicité ci-dessous :

$$\text{Dénomination Combinaisons intermédiaires : } \underbrace{1}_a \underbrace{05}_b \underbrace{01}_e$$

- a : Positionnement de la voie (de 1 à 4)
- b : Numéro de permutation de voie (de 0 à $n!-1$ où n est le nombre de voies)
- e : correspond au résultat de la superposition

L'enveloppe contient donc la charge UDL correspondante avec les charges TS parcourant leur voie. Les charges sur remblais sont également comprises dans l'enveloppe.

5.5.2 Combinaison finale

Les combinaisons intermédiaires sont stockées dans une action LM1 et LM1f.

ACT	G	GAMU	1.35	1	PSI0	1	1	1	PART	'G'	SUP	PERM	TITL	"Poids propre"
ACT	G_1	GAMU	1.35	1	PSI0	1	1	1	PART	'G'	SUP	PERM	TITL	"Superstructures"
ACT	G_2	GAMU	1.35	1	PSI0	1	1	1	PART	'G'	SUP	PERM	TITL	"Poids des terres"
ACT	LM1	GAMU	1.35	0	PSI0	0	0	0	PART	'Q'	SUP	Excl	TITL	"Charges LM1"
ACT	LM1f	GAMU	1.35	0	PSI0	0	1	0	PART	'Q'	SUP	Excl	TITL	"Charges LM1 fréquent"
ACT	T	SUP	COND											

Figure 48 : Définition des actions pour le modèle 3D

Les coefficients des actions LM1 sont notés sans leurs coefficients ψ car les combinaisons intermédiaires prennent déjà en compte ces coefficients.

6. Comparaison, validation et interprétation des résultats

Deux modèles paramétrés d'un PICF sont donc disponibles :

- Modèle 2D à poutre
- Modèle 3D à coque

L'enjeu ici est de vérifier rapidement la validité globale des calculs.

6.1 Comparaison modèle 2D avec une note de calcul

Une fois les deux modèles construits, j'ai pu comparer la validité de mes modèles sur un cas d'application de CHAMOA. Mon tuteur m'a fourni une note de calcul réalisée grâce au programme CHAMOA et une note d'hypothèses d'un ouvrage PICF.

J'ai rentré les données de l'ouvrage dans mon modèle 2D et j'ai regardé les efforts à mi-travée car ce sont les résultats qui sont les plus faciles à interpréter.

Cette vérification grossière a permis de corriger des erreurs et oublis qui n'ont pas été identifiés précédemment :

- Bordereau d'entrée refait en intégralité pour coller au plus proche du modèle CHAMOA
- Prise en compte du fluage et des effets thermiques en traverse qui ont été négligés
- La prise en compte du biais de l'ouvrage a été corrigé

Après correction des erreurs, 3 charges sont comparables et sont dans de bons ordres de grandeurs avec moins de 10% d'erreurs

Tableau 1 : Comparaison des modèles CHAMOA et 2D

		Abscisse x(m)		PP	Remblais techniques	Enveloppe thermique
CHAMOA	TRAVERSE	5,096	Min	-3095,4	893,06	-1724,3
		5,096	Max	-3095,4	1786,1	1086
Modèle 2D		5,096	Min	-3065	946	-1792
		5,096	Max	-3065	1892	1131
Pourcentage d'erreur		5,096	Min	1%	-6%	-4%
		5,096	Max	1%	-6%	-4%

Les charges routières ne sont pas aussi proches mais restent dans le même ordre de grandeur. Ceci s'explique par le fait que le modèle 2D ne prend pas en compte la répartition des charges selon la théorie de Guyon-Massonnet mais se contente de sommer les charges routières. C'est une piste d'amélioration potentielle du modèle.

6.2 Comparaison entre les modèles 2D et 3D

Une fois, le programme 2D finalisé, j'ai travaillé sur le développement du modèle 3D. Commencer par le modèle 2D a permis de faciliter la démarche de compréhension des phénomènes avant d'attaquer la complexité du 3D.

On compare les modèles avec un exemple avec biais faible (90 grades)

Pour le modèle 2D, on regarde le moment à mi-travée dans la traverse. Pour le modèle 3D, on regarde le moment selon une coupe droite à la mi-largeur de l'ouvrage. On mesure le moment dans la direction de coupe à mi-travée.

Pour les charges permanentes :

Tableau 2 : Comparaison des modèles 2D et 3D sous charges permanentes

Moment à mi travée	PP	P_terre max	P_terre min	P_sup max	P_sup min
3D (kN.m/m)	152,25	-100	-50	40,31	29,24
2D (kN.m)	2420	-1687,18	-844	771,22	597,51
2D linéaire (kN.m/m)	146,311971	-102,0060459	-51,02781137	46,62756953	36,12515115
Ecart (par rapport 3D)	+4%	-2%	-2%	-16%	-24%
Descente de charge	PP	P_terre max	P_terre min	P_sup max	P_sup min
3D (kN)	9314,6	0	0	925,1	716,81
2D (kN)	9314,6	0	0	936,7	725,7
Ecart (par rapport 3D)	0%	-	-	-1%	-1%

Pour le poids propre et la poussée des terres, les moments à mi travées sont très proches avec moins de 5% d'erreurs.

Pour la poussée des terres, bien que les descentes de charges soient presque identiques, les moments ont des valeurs différentes (jusqu'à 25%). Ceci s'explique par le fait que dans le modèle 3D, les charges sont appliquées à leur emplacement réel. Notamment le poids des trottoirs et de l'enrobé sont répartis à des endroits différents sur le tablier ce qui implique que la coupe à mi largeur ne sera pas sollicitée de la même manière. (Voir Figure 49)

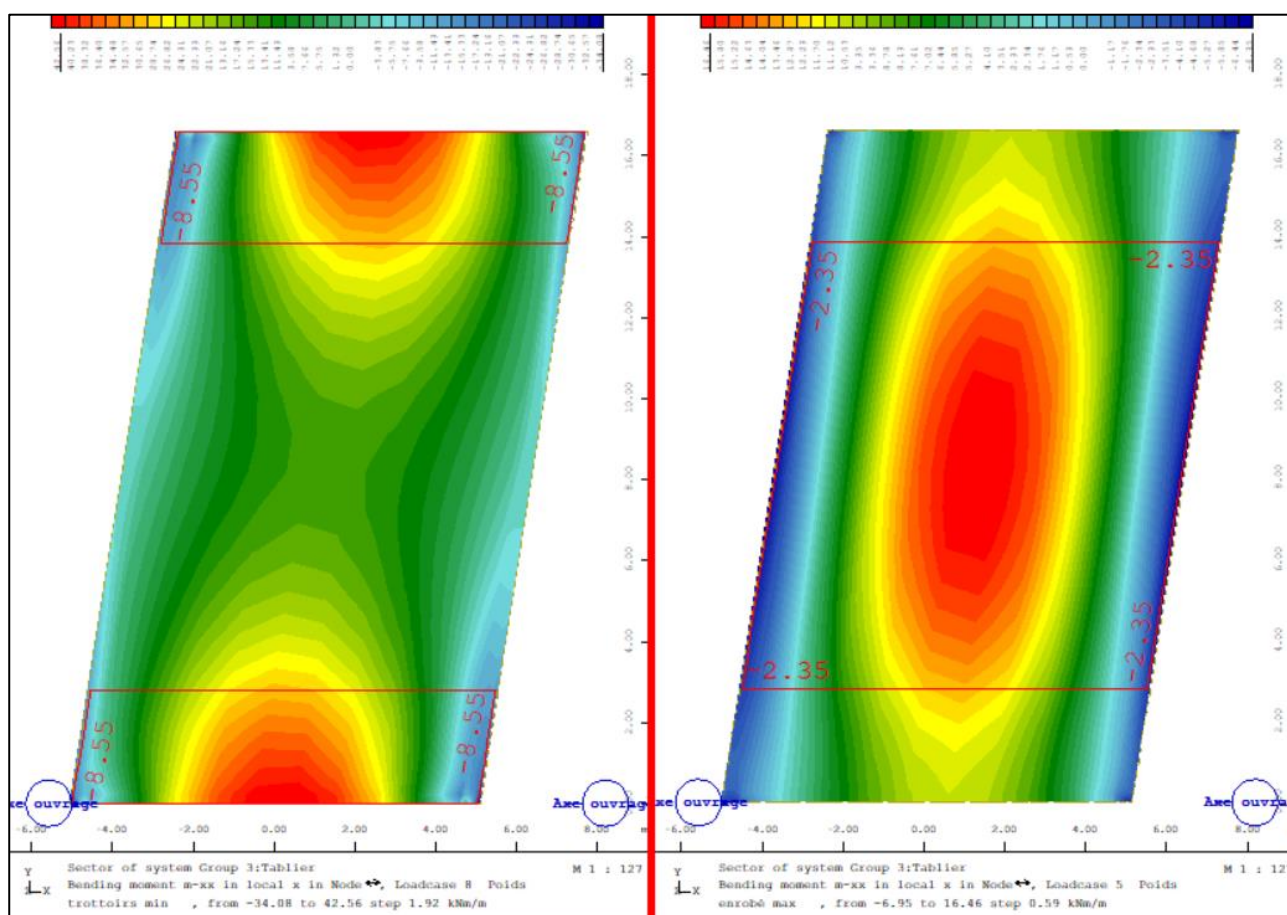


Figure 49 : A gauche MX sous poids des trottoirs et à droite MX sous poids de l'enrobé

Pour les charges routières :

On observe des différences beaucoup plus notables pour les charges TS et UDL (de l'ordre de 30%)

Ceci s'explique par le fait que l'ouvrage est large (16 m) et le modèle 2D n'intègre pas de méthode qui prends en compte l'excentrement des charges. C'est pourquoi le modèle 3D est donc plus pertinent pour des ouvrages larges

Tableau 3 : Comparaison des modèles 2D et 3D sous charges permanentes

Moment à mi travée	TS	UDL
3D (kN.m/m)	155	34,55
2D (kN.m)	1681	425,16
2D linéaire (kN.m/m)	101,63	25,70
Erreur (par rapport 3D)	34%	26%

6.3 Etude du biais prononcé

On étudie le modèle 3D. On se place dans le cas d'un ouvrage au biais prononcé (73 grades) et assez large (13.64 m) pour observer les effets 3D. On étudie les efforts dans la traverse.

On rappelle ici que l'on ne regarde que la moitié supérieure du graphique car les charges routières présentent une erreur de symétrie.

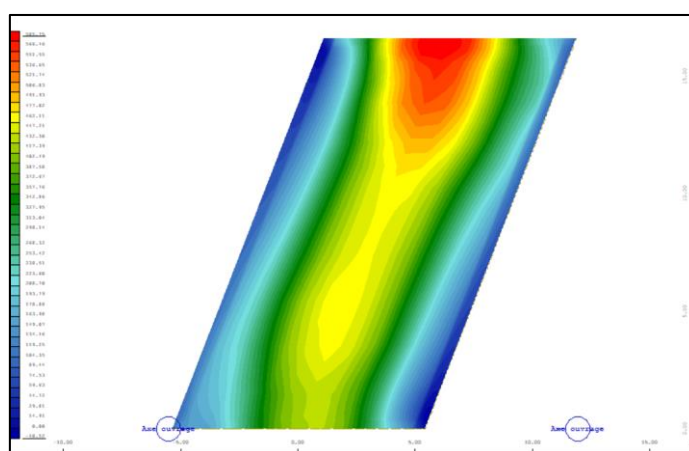


Figure 50 : MXX à l'ELU

On remarque que suivant la coupe prise, les efforts maximaux à mi-travée ne sont pas les mêmes. On voit donc ici l'intérêt du modèle 3D.

En outre, dans le cas d'un fort biais, la poussée des terres s'exerçant sur chaque piedroit présente une résultante qui ne passe pas par le centre de l'ouvrage, créant de facto une rotation/torsion de l'ouvrage.

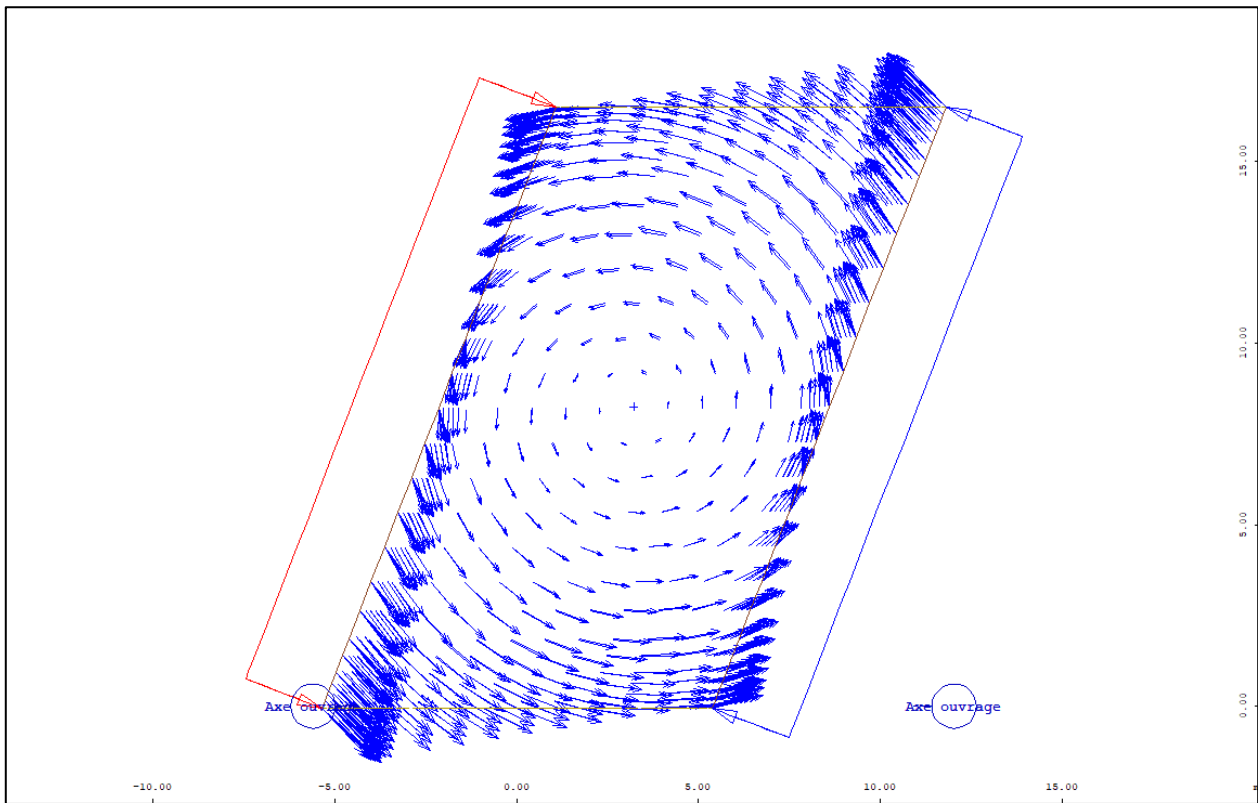


Figure 51 : Déplacements des nœuds du modèle sous poussée des terres

Ces phénomènes sont bien pris en compte dans le modèle 3D mais ne le sont pas dans le modèle 2D. Il faut donc garder ces effets en tête lors du choix du modèle.

7. Expérience acquise avec un autre projet et regard critique sur le travail réalisé

J'explique succinctement dans cette partie un second projet entamé à la suite de la modélisation du PICF. Je présente ici les réflexions qui ont été soulevées et ce qu'elles disent rétrospectivement sur mon premier modèle.

7.1 Flambement non-linéaire d'une pile en béton armé.

Sur la base de l'expérience acquise sur SOFISTIK, j'ai travaillé pendant la seconde moitié de mon stage sur un script de calcul de flambement non-linéaire d'une pile en béton armé. Ce nouveau projet est dans la continuité du précédent, car l'objectif est le même : Automatiser les calculs pour des projets réels.

Ce script est, d'un point de vue technique, plus facile à coder que la modélisation du PICF. Le calcul se fait à priori en quelques lignes de code, mais le but du travail était de comprendre les enjeux derrière le calcul. Une fois la théorie assimilée, il faut créer un modèle pratique pour l'utilisateur et facilement utilisable.

Conclusion : L'expérience acquise par la création du modèle automatisé de PICF sur SOFISTIK, m'a permis de plus facilement exploiter les possibilités de codage permises par le langage CADINP (Paramétrage des variables, boucles et conditions). J'ai donc pu me concentrer pleinement sur les besoins ingénieurs du sujet tout en gardant en tête les possibilités d'automatisation de SOFISTIK qu'il y a derrière.

7.2 Note de modélisation dynamique

Le principe du script ne repose plus sur un bordereau de données à remplir dans le programme, à exécuter les calculs puis exploiter les résultats.

En effet, lors d'une réunion préparatoire sur ce sujet, mon encadrant a évoqué la possibilité de créer une note de modélisation dynamique. SOFISTIK permet, directement à partir de cette note, d'éditer les variables et d'exécuter les calculs.

J'ai donc codé un script qui permet de définir les paramètres régissant le calcul :

- Géométrie de la pile : Hauteurs et conditions d'appuis de la tête et du pied
- Caractéristiques des matériaux : Résistance caractéristique du béton (f_{ck}) et coefficient de fluage
- Les charges de flambement : Charge verticale, charge horizontale et défaut géométrique.
- Type de section

Il est à noter que le paragraphe régissant la section de la pile est totalement dynamique. L'utilisateur a le choix du type de section parmi une liste proposée : Circulaire, rectangulaire ou losange.

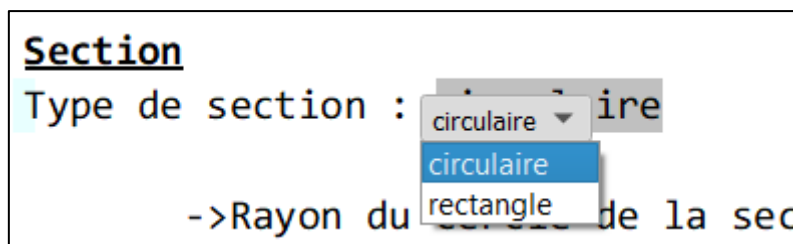


Figure 52 : Choix du type de section

En fonction du choix, la note s'actualise systématiquement pour présenter les paramètres à éditer qui correspondent à cette typologie de section.

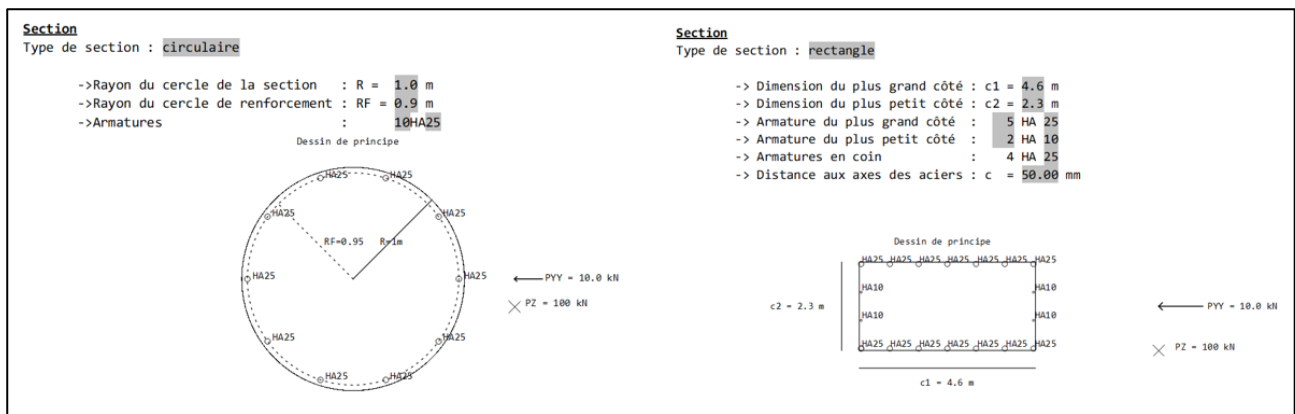


Figure 53 : A gauche interface pour définition d'une section circulaire à droite interface pour définition d'une section rectangulaire

Une fois les paramètres de calculs renseignés dans la note dynamique, l'utilisateur presse la touche F12 pour exécuter les calculs. Quatre résultats graphiques sont affichés à titre indicatif à la fin de la note, les efforts (N , V , M) et la flèche dans la pile après calcul non linéaire. Si l'utilisateur souhaite d'autres résultats, il peut utiliser les fonctionnalités classiques de SOFISTIK pour les trouver.

Un exemple de note de modélisation dynamique est présenté en annexe 5.

Conclusion : Il pourrait être intéressant de mettre à jour le modèle de PICF avec la possibilité de créer une note de modélisation dynamique comme évoquée dans cette partie. Cela permettrait notamment à des personnes qui ne sont pas familières avec le logiciel de quand même pouvoir utiliser le script.

Remarque : Je me suis aperçu que bien que la note dynamique soit assez puissante, elle reste tout de même assez limitée. En interne, SOFISTIK stocke du texte dans un script qui est édité ensuite par l'interface directement dans le code. Le fait que ce soient des caractères et non des variables, limite fortement les possibilités. Il n'est pas possible par exemple de créer des listes de taille variable, vu qu'il faut que le texte soit stocké préalablement à la main dans le script.

A moins que la structure du code ne soit entièrement revue par l'assistance technique de SOFISTIK, l'outil restera donc toujours limité.

7.3 Praticité pour l'utilisateur

Le problème de l'automatisation des calculs, pour le codeur, est que plus on cherche à créer un modèle global, plus le nombre de paramètres à prendre en compte est élevé.

Si un modèle est très complet mais trop complexe à utiliser, les utilisateurs préféreront créer leur propre modèle qui répondra à leurs besoins spécifiques. Il est donc important de prendre du recul sur le travail réalisé et ne garder que ce qui est nécessaire, quitte à simplifier les calculs, ou laisser l'utilisateur faire les calculs par lui-même.

C'est ce dont je me suis rendu compte lors de mon travail sur le flambement. Je voulais réaliser un modèle très complet avec possibilité d'avoir des sections différentes, variables. Je me suis vite retrouvé limité par les capacités de programmation de SOFISTIK. Après retour de mon encadrant, nous avons convenu qu'il était plus pratique de créer deux modèles avec des objectifs différents :

- Un modèle simple à section unique, complètement automatisé avec une interface graphique
- Une trame de code, qui servira de modèle à l'ingénieur qui doit réaliser un modèle plus complexe

CONCLUSION : Cette problématique m'a directement renvoyé à ce que j'avais fait sur le PICF : j'avais d'abord essayé d'automatiser le maximum de calcul, quitte à rendre des sujets simples, complexes. C'était le cas par exemple du retrait du béton. J'ai donc fait machine arrière et j'ai simplifié le sujet : C'est maintenant à l'utilisateur de faire le calcul de la déformation du béton, pas au programme.

7.4 Affordance

L'affordance, ou potentialité, est la caractéristique d'un objet ou d'un environnement qui suggère à son utilisateur son mode d'usage ou autre pratique.[11]. Ce terme est courant dans le monde de la programmation et plus particulièrement dans le design des interfaces graphiques (UX-Design)

Concrètement, je me suis rendu compte qu'il était très important de bien présenter l'interface à l'utilisateur du programme. Dans l'idéal, il n'aurait pas besoin de consulter une notice pour comprendre quoi faire et à quoi correspond chaque information.

Dans les faits, j'utilise beaucoup la possibilité de réaliser un dessin paramétré dans le rapport de SOFISTIK. Celui-ci a un double effet :

- Comprendre instantanément à quoi correspondent les données rentrées par l'utilisateur (un dessin vaut mille mots)
- Vérifier rapidement que les données rentrées correspondent bien au modèle souhaité (on repère ainsi facilement une erreur d'unité)

Il est également important de prendre gare à ne pas trop utiliser de notations personnelles. Notamment, les axes doivent généralement être placés de manière que Z soit dirigé vers le haut (En 2D SOFISTIK place Y vers le haut). Ainsi, il faut éviter toute confusion, pour que les données d'entrées et les résultats soient le plus clair possible pour l'utilisateur.

Conclusion : Pour le modèle PICF, je me suis beaucoup concentré sur la partie technique et modélisation, mais pas assez sur la partie utilisateur. Avec le recul, c'est une erreur car c'est finalement la partie la plus importante du programme. Si le script n'est pas simple d'utilisation, il ne sera jamais utilisé et le travail accompli n'aura servi à rien.

7.5 Vérification préliminaire de la modélisation

De manière générale pour la modélisation informatique, les erreurs sont très faciles à faire et parfois difficiles à détecter. Ceci est d'autant plus vrai lorsque l'on cherche à automatiser les calculs, il existe toujours un cas que l'on n'avait pas envisagé qui ne fait pas tourner le modèle comme prévu.

Début juillet, j'ai eu, avec d'autres Ingénieurs, une formation de 2 jours sur le sujet de la modélisation qui faisait écho au travail que j'ai réalisé. J'ai appris que pour pouvoir anticiper un maximum d'erreurs, il est important de vérifier, même rapidement, quelques témoins qui peuvent nous alerter sur la justesse du modèle.

On peut par exemple vérifier que graphiquement, la structure est juste et proportionnelle au résultat attendu. Certains calculs peuvent être vérifiés à la main (flèches, moment à mi travée etc.).

Conclusion : En testant d'autres paramètres sur le modèle 3D du PICF, je me suis rendu compte que toutes les charges étaient inversées symétriquement par rapport à l'axe de l'ouvrage. Après quelques heures de recherche, je me suis rendu compte que je n'avais simplement pas anticipé le fait que le biais de l'ouvrage pouvait être supérieur à 100 grades (c'est-à-dire incliné dans l'autre sens que celui prévu). J'ai donc simplement rajouté une ligne de code qui ramène artificiellement de biais de l'ouvrage à celui de son symétrique.

8. Pistes d'amélioration du modèle

8.1 Interface graphique

Comme expliqué au §7.2, il est possible de faire rentrer, par l'utilisateur, les données d'entrées dans une interface graphique. Cette solution permettra :

- D'améliorer le confort utilisateur en créant une interface plus claire
- D'éviter les « fausses manips » qui pourraient modifier le code

De plus, à l'aide du travail déjà réalisé, cette mise à jour du modèle serait facilement implémentable.

8.2 Module Sismique

Il pourrait être intéressant de réaliser en parallèle des calculs, une étude sismique du PICF.

La méthode classique pour calculer l'ouvrage au séisme consiste à calculer le spectre de sollicitation du séisme et de calculer les modes propres de l'ouvrage. Un calcul spectral sur SOFISTIK permet alors de d'obtenir les sollicitations au séisme.

Cependant, les ponts cadres et les portiques sont globalement peu sensibles aux séismes, car ils suivent les déformations du massif [13]. Il est donc possible d'appliquer une méthode d'analyse pseudo-statique.

On pourra notamment évaluer l'incrément dynamique de poussée active par la formule suivante :

$$\Delta E_d = E_d - E_0 = \frac{1}{2} \gamma^* H^2 [(1 \pm k_v) K_{ad}] + E_{ws} + E_{wd} - \frac{1}{2} \gamma^* K_{as} H^2$$

avec :

- γ^* : poids volumique du sol tenant compte des conditions hydrauliques ;
- k_v : coefficient sismique vertical ;
- K_{ad} : coefficient de poussée des terres sous situations de projet sismiques ;
- K_{as} : coefficient de poussée des terres sous charges statiques ;
- E_{ws} : poussée statique de l'eau ;
- E_{wd} : poussée hydrodynamique de l'eau ;

Figure 54 : Formule de l'incrément dynamique [13]

La démarche à adopter est détaillée dans le chapitre 7 du guide du CEREMA sur les ponts en zone sismique.

8.3 Ferrailage

En l'état, le calcul du ferrailage est une ébauche. Plusieurs aspects restent encore à améliorer et à approfondir. Des pistes d'approfondissements sont listées ci-dessous :

- Calcul qui tient compte du biais. Actuellement, le ferrailage se fait suivant le repère global ce qui n'est pas fait ainsi dans la réalité.
- Optimisation de l'effort tranchant
- Décalage de la courbe des moments
- Vérification d'un ferrailage proposé par l'utilisateur.

Pour plus de détails sur le calcul de ferrailage pour un cadre ou un portique biais, on peut se référer au Guide de conception des ponts cadres et portiques du SETRA [2]

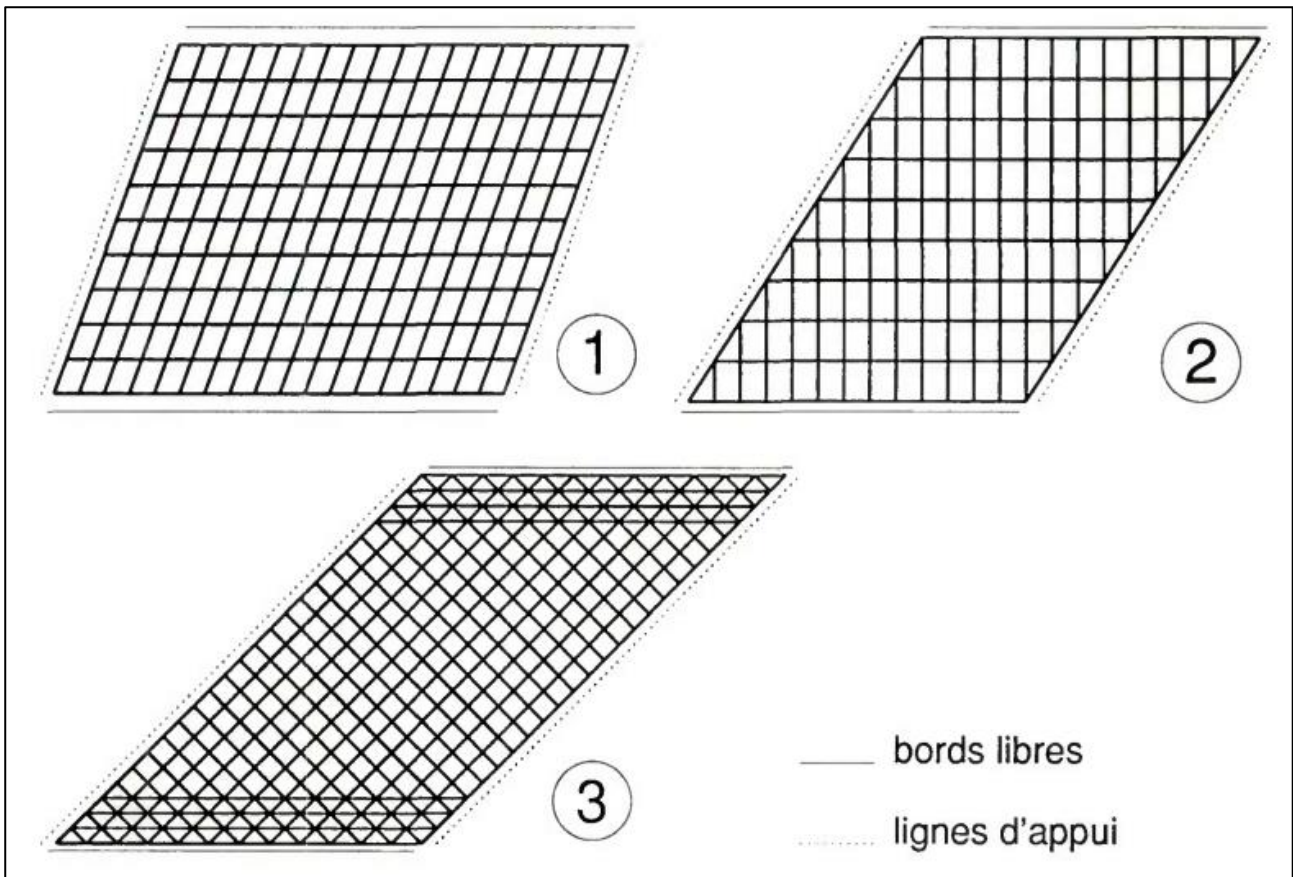


Figure 55 : 3 Possibilités de ferrailage pour un ouvrage biais [2]

8.4 Ouvrages préfabriqués par morceau

Le modèle proposé en l'état calcule correctement des ouvrages coulés en place. Cependant, dans le cas d'ouvrages préfabriqués assemblés par morceau, les charges ne se répartissent pas uniformément entre les différentes pièces de l'ouvrage.

Prendre en compte cette possibilité est donc une piste d'amélioration du modèle.

8.5 Méthode de Guyon Massonnet en 2D

Cette méthode vise à déterminer les efforts transitant dans un grillage de poutres soumis à un chargement quelconque, ponctuel ou réparti. Le système dalle-poutre discret est remplacé par un système uniforme composé d'une dalle anisotrope ou orthotrope ayant des caractéristiques constantes suivant chacun de ses axes transversaux et longitudinal [12]

- La construction réelle est remplacée par une dalle orthotrope présentant les mêmes rigidités moyennes de flexion et de torsion
- La répartition transversale réelle du chargement est remplacée par celle qui naît sous une charge répartie le long de l'axe X de la construction et d'excentricité « e »

Ici cela permet de moduler chaque charge routière par un coefficient qui dépend de l'excentrement de la charge. On se rapproche donc du cas réel.

Cette méthode est utilisée par le programme CHAMOA et permet d'avoir des résultats plus justes dans le cas d'ouvrages larges. Elle pourrait donc être pertinente pour le modèle 2D.

Ce modèle reste toutefois assez complexe à implémenter et pourrait être éventuellement complété par un calcul externe (Feuille EXCEL) qui permettrait de rentrer les valeurs des coefficients dans le bordereau de données.

8.6 Validation du modèle en interne

L'enjeu de la mission qui m'a été confiée par ARCADIS était de réaliser des modèles aux éléments finis paramétrables d'ouvrages de type PICF.

Avant de déployer des programmes à ARCADIS, ceux-ci doivent préalablement faire l'objet d'une validation interne. Cette validation dépasse le cadre de ma mission (bien que j'aie réalisé déjà quelques vérifications de mon côté pour corriger un maximum d'erreurs de mon modèle). Cette mission va probablement être confiée à un autre stagiaire ou à des Ingénieurs d'étude sur projets par comparaison avec l'utilisation du programme CHAMOA.

Même après validation, il serait intéressant de continuer à améliorer le modèle, en fonction des retours utilisateurs, que ce soient des remarques techniques, ou d'ergonomie. Ce rôle pourra être assuré par le Direction Technique, qui crée régulièrement de nouveaux programmes et feuilles de calcul utilisés par les ingénieurs et qui fournit régulièrement des mises à jour.

9. Conclusions

9.1 Conclusion sur les modèles

La mission qui m'a été confiée par ARCADIS consiste à créer un modèle paramétré sur SOFISTIK d'un ouvrage de type PICF.

Dans le cadre de cette étude deux modèles ont été initiés :

- **Un modèle 2D à poutres**, adapté aux ouvrages peu biais et peu larges mais avec un temps de calcul réduit.
- **Un modèle 3D à Coque**, adapté à tous les types d'ouvrages mais plus gourmand en ressources.

Chaque modèle possède ses atouts et limites qu'ils convient de garder à l'esprit avant utilisation.

Toutefois, avant d'être déployé chez ARCADIS, ces modèles doivent prendre en compte les pistes d'améliorations évoquées précédemment et faire l'objet d'un contrôle interne.

9.2 Conclusion personnelle

Cette expérience a été enrichissante sur plusieurs niveaux. J'ai beaucoup appris sur les programmes que j'ai réalisés dans le cadre de ce TFE mais aussi sur les affaires sur lesquelles j'ai pu travailler (Travaux de réhabilitation de buses en phase avant-projet, Rédaction d'une note d'épreuve pour un passage supérieur et calcul de descente de charge sur un ouvrage de type PRAD)

D'un point de vue théorique :

J'ai beaucoup appris sur les notions fondamentales du génie civil.

- J'ai découvert la théorie Guyon-Massonnet et plus généralement approfondi les notions vues en cours sur les éléments plaques.
- J'ai aussi poussé les notions réglementaires associées aux Eurocodes mais également aux anciens règlements.
- J'ai approfondi les notions de dimensionnement de pont sous sollicitations sismiques que j'ai vu en cours de Génie Parasismique à l'ENTPE.

D'un point de vue modélisation :

La création de programmes automatisés SOFISTIK associée à la formation modélisation à laquelle j'ai assisté m'a beaucoup appris sur la modélisation en ouvrage d'art. Quelques grands concepts m'ont beaucoup marqué :

- Une modélisation reste toujours une représentation simplifiée de la réalité, il convient alors d'adapter le modèle à ce que l'on veut étudier.
- Il ne faut pas hésiter à se questionner sur le fonctionnement du logiciel (penser à lire la notice), chercher quelles données sont initiées par défaut et comparer avec ce qui est réglementaire.
- Il faut systématiquement vérifier à la main l'ordre de grandeur des résultats, car les erreurs sont très faciles à faire et parfois difficile à observer. Certains marqueurs sont là pour nous alerter (messages d'erreurs du logiciel, déformations aberrantes de l'ouvrage, ou bien flèche trop importante).
- La représentation la plus proche réelle n'est pas forcément la plus juste (exemple de modélisation d'un pont à poutre avec hourdis)

De manière générale, il faut toujours garder du recul sur son travail et constamment se questionner sur la pertinence des choix de modélisation.

D'un point de vue méthodologie :

Me former auprès d'ingénieurs ouvrage d'arts et d'experts techniques m'a permis d'améliorer ma méthodologie de travail.

J'ai appris à travailler avec les règlements, à ne laisser aucun flou sur les hypothèses prises, et toujours garder du recul sur le travail d'autres ingénieurs. En effet il faut toujours chercher à comprendre quelles hypothèses ont été prises, si elles sont pertinentes et quelles sont leurs limites de validité.

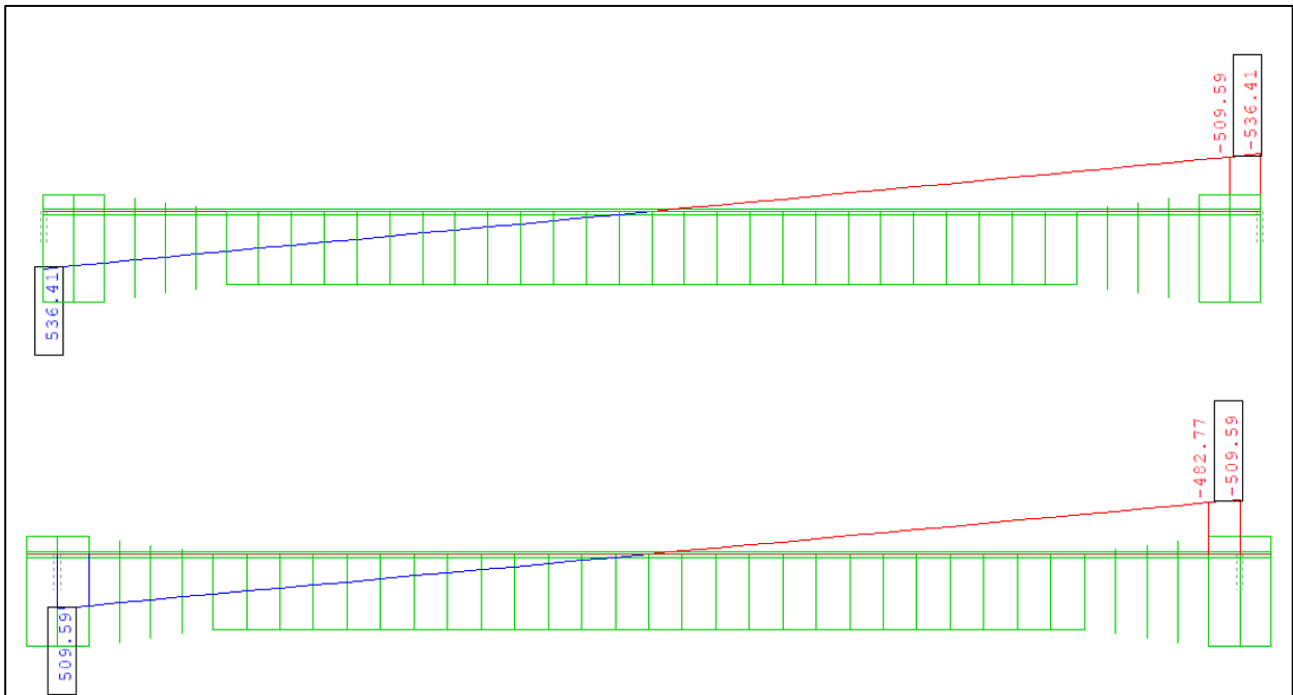
J'ai appris à expliquer au mieux les calculs réalisés et à toujours commenter le code. Cela permet à d'autres ingénieurs de poursuivre le travail accompli mais surtout de pouvoir revenir plusieurs mois après sur une note ou un code et de comprendre ce qui a été fait. De plus cela permet de prendre du recul sur les calculs et de se questionner sur les hypothèses.

Références bibliographiques

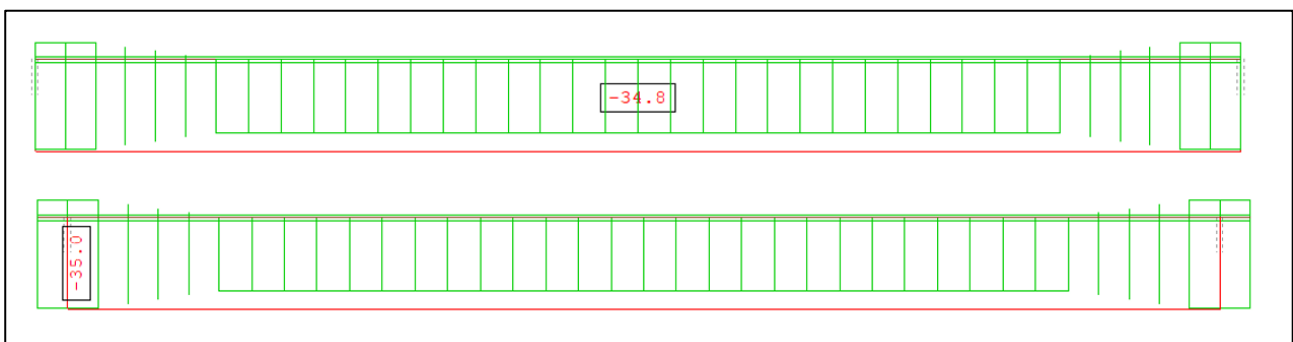
- [1] Programme de calcul PICF-EL, SETRA (1991)
- [2] Ponts – cadres et portiques – Guide de conception, SETRA (1992)
- [3] Formation Conception générale des ponts, Jean Pierre BRETON, CEREMA (2019)
- [4] Eurocode 2 – Application aux ponts -routes en béton, SETRA (2008)
- [5] Eurocode 0 et 1– Application aux ponts routes et passerelles, SETRA (2010)
- [6] Guide technique CHAMOA – PICF, CEREMA (2023)
- [7] Guide technique CHAMOA – PIPO, CEREMA (2016)
- [8] Manuel d'utilisation SOFISTIK (2024)
- [9] Charges sur les Ponts routiers selon l'EUROCODE 1 Partie 3, CETE
- [10] Documentation Cadres béton, VIBROMAT (2013)
- [11] Affordance, WIKIPEDIA, URL: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Affordance>
- [12] LA METHODE DE GUYON-MASSONNET-BAREŠ, TERMOUL Tarek (2009-2010), URL : https://www.tarekdata.com/FR/rap/la_methode_guyon-massonnet.pdf
- [13] Ponts en zone sismique, Conception et dimensionnement selon l'Eurocode 8, CEREMA

Annexe 1 : Comparaison des modèles de définition de l'axe des poutres

Effort tranchant sous chargement uniforme (Axe de définition des poutres sur l'extrados en haut et sur l'axe neutre en bas)



Effort normal sous chargement uniforme (Axe de définition des poutres sur l'extrados en haut et sur l'axe neutre en bas)



Annexe 2 : Note de modélisation : PICF

Arcadis NV
SOFISTIK 2024-3.0 AQUA - GENERAL CROSS SECTIONS

Page 1
2024-08-13

Géométrie
Note

Matériau béton :

-> Fck = 35 MPa
-> Ecm = 34077.145 MPa

Charges routières :

Ouvrage routier de 1(e) classe

Largeur totale de la chaussée : 14.000 m => 4 voie(s) conventionnelle(s).

Voie 1 --> Largeur : 3.000 m UDL : 9.000 kN/m² TS : 300.000 kN

Voie 2 --> Largeur : 3.000 m UDL : 3.000 kN/m² TS : 200.000 kN

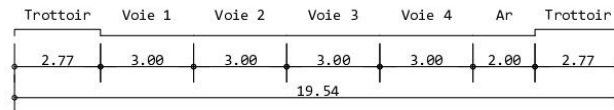
Voie 3 --> Largeur : 3.000 m UDL : 3.000 kN/m² TS : 100.000 kN

Voie 4 --> Largeur : 3.000 m UDL : 3.000 kN/m² TS : 0.000 kN

Largeur de l'aire résiduelle : 2.000 m

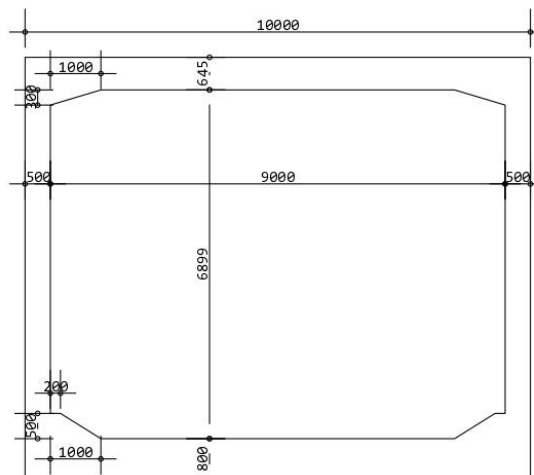
Largeur des trottoirs : 5.540 m

Profil de chaussée :



SOFISTIK AG - www.sofistik.de

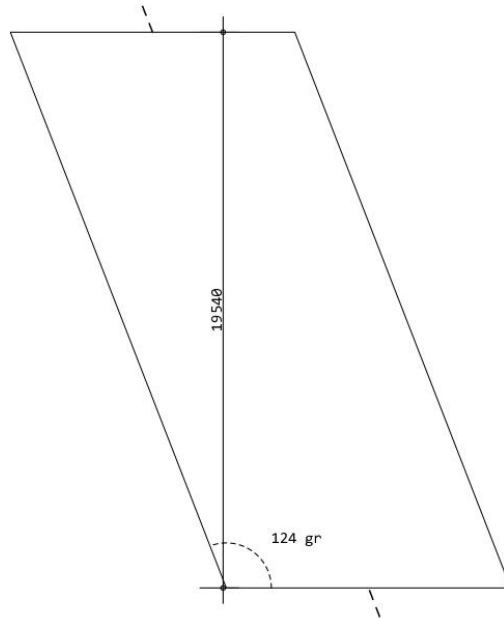
Section transversale:



Géométrie
Note

Vue en plan:

-> Biais de louvrage 124 gr



SOFSTIK AG - www.sofstik.de

Annexe 3 : Listes des paramètres du modèle

```

$-----
$-----/!\Biais/!\-----
$-----

STO#BIAIS    123.59    $[grad] Biais
STO#xbiais  SIN(RAD,#BIAIS*#PI/200)
$-----
$-----/!\Géométrie/!\-----
$-----

!! Coupe Transversale
$ GEOM - Coupe trans tablier
STO#LTG      2.77      $[m]Largeur trottoir gauche
STO#LTD      2.77      $[m]Largeur trottoir droit
STO#LC       14       $[m]Largeur de la chaussée
STO#HDIF_TG  0        $[m]Hauteur chaussée diffusion gauche
STO#HDIF_TD  0        $[m]Hauteur chaussée diffusion droit
STO#LDIF_C   0.08     $[m]Hauteur chaussée diffusion centre
$ GEOM - Remblais sur traverse
STO#BG       0        $[m]Largeur berme gauche      }
STO#BD       0        $[m]Largeur berme droite      } Si présence de remblais
STO#TG       0        $[m]Largeur Talus gauche      }
STO#TD       0        $[m]Largeur Talus droite      }
STO#H_TALUS  0        $[m]hauteur talus          }
STO#k1_re    0.9      $                          }
STO#k2_re    1.10     $                          }
STO#LT       #BG+#TG+#LC+#LTD+#LTG+#TD+#BD  $[m]Largeur du tablier (droit)

!! Coupe longitudinale
$GEOM - Coupe long tablier droite
STO#E        9        $[m]Portée (droit)
STO#EE       0.099    $[m]Epaisseur extradados équivalente
STO#ET       0.546+#EE  $[m]Epaisseure de la traverse
$GEOM - Goussets
STO#LGTG     1        $[m]Longueur droit  }
STO#HGTG     0.3      $[m]Hauteur      } Gousset Traverse Gauche puis Droite
STO#LGTD     1        $[m]Longueur droit  }
STO#HGTD     0.3      $[m]Hauteur      }
STO#LGRG     1        $[m]Longueur droit  }
STO#HGRG     0.5      $[m]Hauteur      } Gousset Radier Gauche puis Droite
STO#LGRD     1        $[m]Longueur droit  }
STO#HGRD     0.5      $[m]Hauteur      }
STO#MG       0.2      $[m]Méplat
$GEOM - Piédroits et radier
STO#ER       0.8      $[m]Epaisseur du radier
STO#HL       6.899    $[m]Hauteur libre
STO#HP       #HL+#ER+#ET  $[m]Hauteur piédroits
STO#EP       0.5      $[m]Epaisseur droite piédroits (droite)
STO#LPI      #LT      $[m]Largeur piédroits (droite)
STO#ENTRAXE  #E+#EP    $[m]Entraxe

```

```

$-----
$-----/!\Materiaux/!\-----
$-----

STO#FCK          35      $[Mpa]
STO#EC           22000*((#FCK+8)/10)^0.3 $[Mpa]
$-----
$-----/!\SUPERSTRUCTURES/!\-----
$-----

$chape d'étanchéité
STO#E_ch         0.03    $[m]Epaisseur
STO#Pv_ch        24.00   $[kN/m3]Poids volumique
STO#k1_ch        0.80    $[-]Coefficient k1
STO#k2_ch        1.20    $[-]Coefficient k2
$Enrobés
STO#E_en         0.07    $[m]Epaisseur
STO#Pv_en        24.00   $[kN/m3]Poids volumique
STO#k1_en        0.80    $[-]Coefficient k1
STO#k2_en        1.40    $[-]Coefficient k2
$Trottoirs
STO#E_tr         0.375   $[m]Epaisseur
STO#Pv_tr        24.00   $[kN/m3]Poids volumique
STO#k1_tr        0.95    $[-]Coefficient k1
STO#k2_tr        1.05    $[-]Coefficient k2
$Remblais
STO#CR           1       $[-]Coefficient de MARSTON
$-----
$-----/!\GEOTECHNIQUE/!\-----
$-----

$ Sol de fondation
STO#Esol         100     $[MPa]Module d'young du sol de fondation
LET#B_fond       min(#ENTRAXE+#EP,#LR)
LET#L_fond       max(#ENTRAXE+#EP,#LR)
STO#KV           6970
STO#KH           0.5*#KV   $[kN/m3] raideur horiz semelle
PRT#KV
$ Remblais techniques
STO#GSL          20      $[kN/m3]Poids volumique sol
STO#Kmin         0.25    $[-]Coeff poussée des sol min
STO#Kmax         0.50    $[-]Coeff poussée des sol max
STO#kmoy         (#Kmax+#Kmin)/2
$-----
$-----/!\Précision du modèle/!\-----
$-----

STO#maillage 0.3  $[m]Densité du maillage
STO#nboucle 20    $[-]Nombre de pas à calculer pour les charges TS

```

```

$-----
$-----/!\Diffusion des charges/!\-----
$-----
$Chaussée
STO#hdif_c  0.8      $[m]Hauteur de diffusion dans la chaussée
STO#beta_c  45      $[°]Angle de diffusion dans la chaussée
$Remblais
STO#hdif_r  #h_talus  $[m]Hauteur de diffusion dans le remblais
STO#beta_r  30      $[°]Angle de diffusion dans le remblais
$Dalle
STO#hdif_d  #ET      $[m]Hauteur de diffusion dans la dalle
STO#beta_d  45      $[°]Angle de diffusion dans la dalle
$-----
$-----/!\Charges routières/!\-----
$-----

! *! Charges routières
STO#CLAS_OA  1  $ 1 ou 2
STO#VOIE     #LC $ Largeur circulaire
STO#Ltrott  #LTG+#LTD $ largeur totale des trottoirs

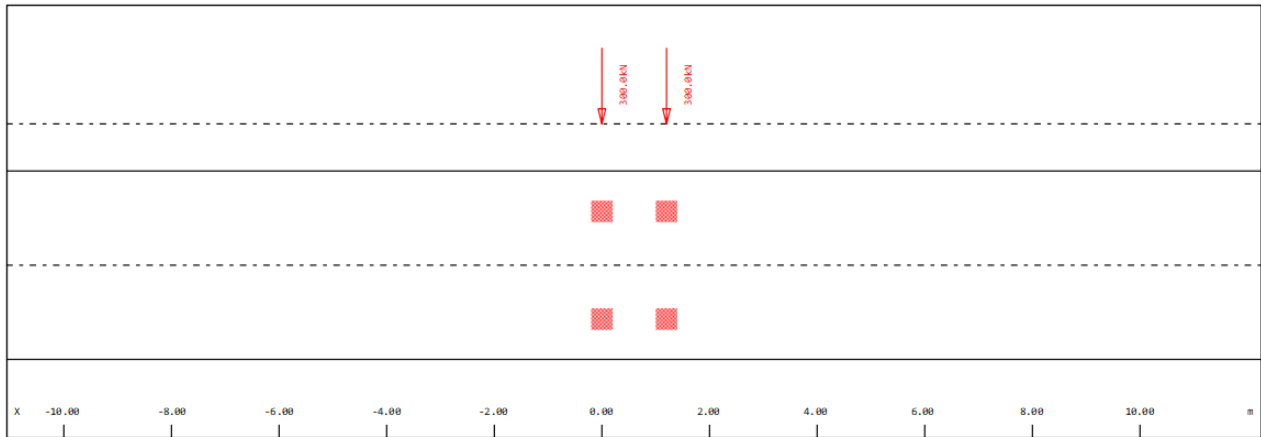
```

Annexe 4 : Définition des convois

Load Train 1201 (LM1) Convoi 0

USER User defined

Load elements of Load Train	Load value	Remark
Total factor	1.000 [-]	
Width of loading	3.500 [m]	
Convoy Loading	25.000 [m]	
Fact.centrifugal	1.000 [-]	
Loading travels in both directions		
Transverse loading in unfavourable direction		

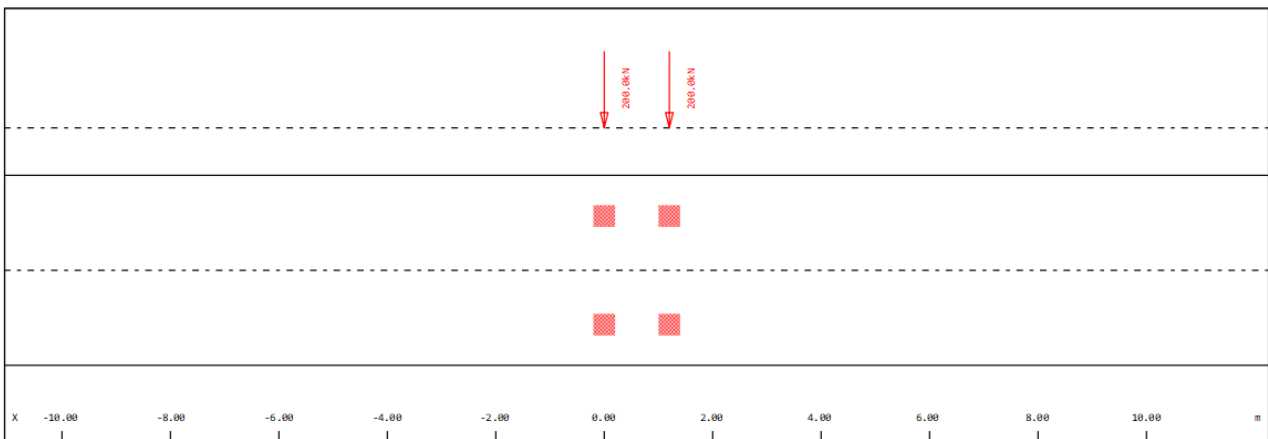


User defined

Load Train 1202 (LM1) Convoi 1

USER User defined

Load elements of Load Train	Load value	Remark
Total factor	1.000 [-]	
Width of loading	3.500 [m]	
Convoy Loading	25.000 [m]	
Fact.centrifugal	1.000 [-]	
Loading travels in both directions		
Transverse loading in unfavourable direction		

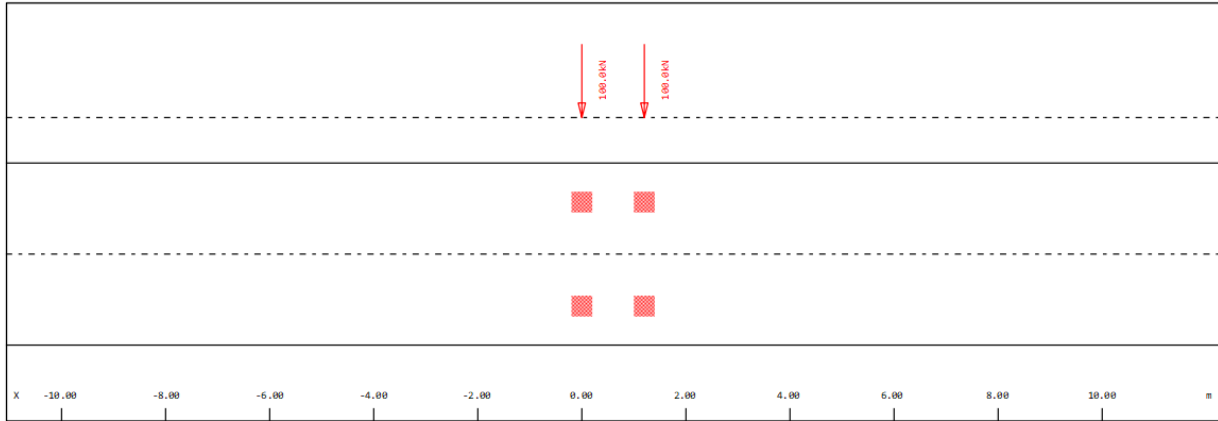


User defined

Load Train 1203 (LM1) Convoi 2

USER User defined

Load elements of Load Train	Load value	Remark
Total factor	1.000 [-]	
Width of loading	3.500 [m]	
Convoy Loading	25.000 [m]	
Fact.centrifugal	1.000 [-]	
Loading travels in both directions		
Transverse loading in unfavourable direction		



User defined

Annexe 5 : Note de calcul dynamique

Arcadis NV
SOFISTIK 2024-3.0 TEMPLATE - GENERAL PRE- AND POSTPROCESSING COMMENTS

Page 1
2024-08-15

Géométrie
Données

Flambement de pile béton à section unique

Caractéristiques du béton

Résistance $f_{ck} = 35.00$ MPa
Fluage $\phi = 2.00$

Géométrie

Hauteur de la pile

-> Hauteur de la pile : 35

Définition des conditions d appuis en pied P=Direction bloqué M=Rotation bloqué PM=Encastrement

-> Selon la direction X:PXX

-> Selon la direction Y:PYY

-> Selon la direction Z:PZZ

Définition des conditions d appuis en tête

-> Selon la direction X:Libre

-> Selon la direction Y:Libre

-> Selon la direction Z:Libre

Charges

Force verticale : PZ = 100.0 kN

Force horizontale : PYY = 10.0 kN

Inclinaison : 1/200.0

Section

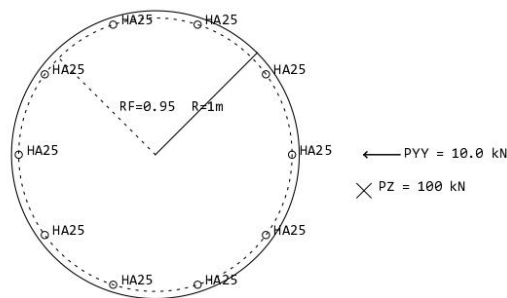
Type de section : circulaire

->Rayon du cercle de la section : R = 1.0 m

->Rayon du cercle de renforcement : RF = 0.9 m

->Armatures : 10HA25

Dessin de principe



Condition de non-flambement :

Longueur de flambement : 64 m

-> Coefficient d'élanement : 128.000 > Coefficient d'élanement limite : 291.791

-> Les effets du second ordre peuvent être négligés

Géométrie
 Compilation

SOFISTIK AG - www.sofistik.de

