

Die neue Fussgängerbrücke über die Verzasca (TI)

G. Masotti, Studio d'ingegneria, Bellinzona, CH

Passerelle piétons / cyclistes sur la Verzasca entre les Communes de Gordola et Tenero-Contra



Le projet d'une nouvelle passerelle sur la rivière "Verzasca", est justifiée par la nécessité d'assurer la continuité des cheminements piétons/cyclistes d'intérêt cantonal, entre Bellinzona et Locarno. L'ouvrage se situe sur le territoire des Communes de Gordola et Tenero-Contra, à proximité de l'embouchure de la Verzasca avec le Lac Majeur, au nord de la Ville de Locarno.

Les travaux ont commencé en hiver 2003 et ont été terminés à fin juillet 2004.

1. Introduction

1.1 Contraintes du projet

La distance totale à franchir par l'ouvrage est de 120 m entre les berges de la rivière.

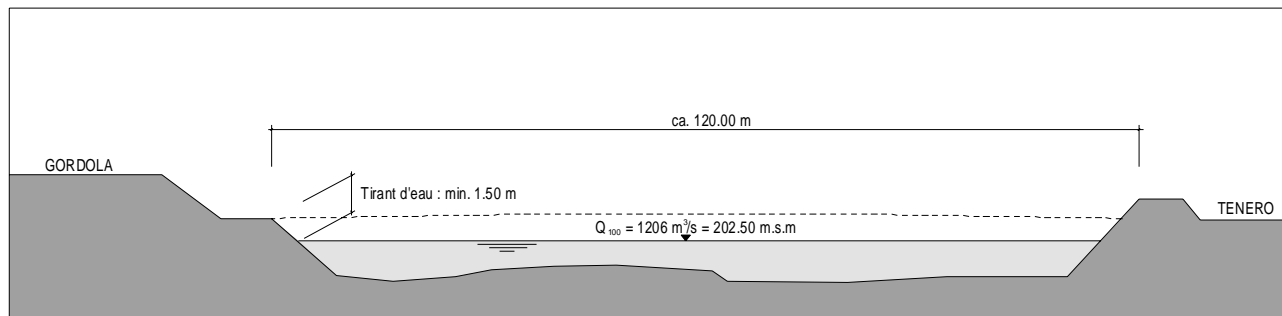


Figure 1.1: Profil schématique de la rivière Verzasca

Les principales contraintes du projet sont liées au respect du tirant d'eau minimal, aux niveaux des cheminements existants auxquels est raccordé l'ouvrage, ainsi qu'au souhait de limiter les interventions dans le lit de la rivière. L'ouvrage doit également supporter différentes infrastructures, telles que les conduites d'eau potable, l'électricité, etc..

Etant donné la vocation touristique de la région, il a été souhaité que l'ouvrage eprésente un point de référence et de rappel, aussi bien pour les habitants du lieu que pour les touristes, dans leurs activités de loisirs et de promenade. Des solutions traditionnelles (treillis, poutres à âme pleine, etc.) ont ainsi été écartées puisqu'elles conduisaient à des structures porteuses trop importantes entraînant un impact visuel inacceptable.

1.2 Concept du projet

L'approche du projet fait référence à l'analyse du site, qui est caractérisé par une forte présence de végétation typique des fond de vallée.

Les premières réflexions visant à définir le genre de structure à proposer, ont amené à parcourir à nouveau la Vallée de la Verzasca pour aboutir à la (re)découverte de l'ancien pont en pierre naturelle de Lavertezzo.



Figure 1.2: Ancien pont à Lavertezzo / premier croquis de la passerelle

C'est de cette forme, avec la collaboration de l'architecte F. Brogini, qu'est né le concept général du projet.

2. La construction

La solution retenue est caractérisée par des arcs de portée : $2 \times 60 \text{ m} = 120 \text{ m}$, réalisés avec des tubes en acier. Le tablier est constitué de poutres maîtresses en profil HEA/RHS, supportant des dalles préfabriquées en béton armé et suspendu aux arcs par des tirants.

L'acier choisi est du type Fe E 355, à l'exception d'une partie du tablier qui est en Fe E 235.

2.1 Bases de calcul

La sécurité structurale et l'aptitude au service ont été vérifiées selon la norme SIA 160 (1989). Les parties en béton et en métal ont été dimensionnées selon les normes SIA 162 (1993) respectivement SIA 161 (1990).

2.2 Système statique

La structure porteuse est symétrique. Le système statique est caractérisée par deux arcs concentriques, encastrés dans toutes les directions, aux deux culées et au pilier central.

La stabilisation horizontale des arcs est assurée par des entretoises en forme de K pour former une structure porteuse autostable.

Le tablier est suspendu par des paires de tirants tous les 4.0 m disposés en harpe convergeant en un point.

Dans le sens longitudinal, le tablier est fixé au centre, au droit du croisement avec les arcs. Il repose sur des appuis glissants dans la zone des culées où sont situés les joints de dilatation. Ces appuis sont bloqués transversalement.

La rigidité horizontale est assurée par un contreventement dans le plan avec des butées aux culées ainsi qu'au pilier central.

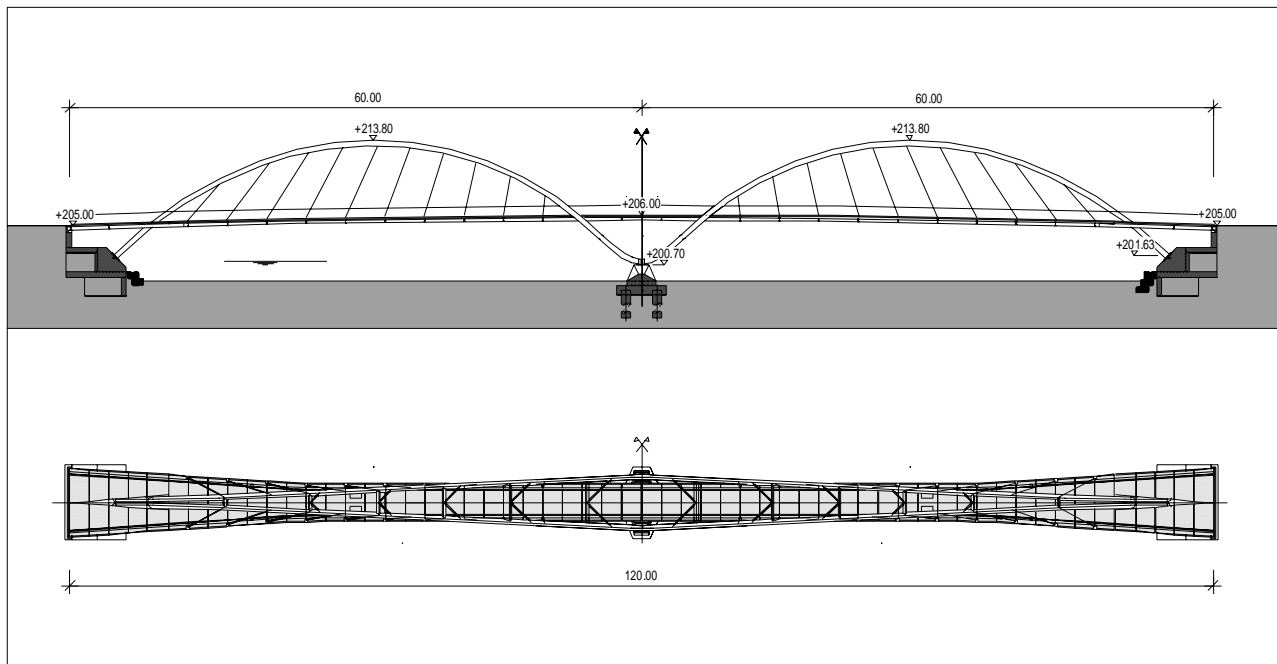


Figure 2.1: Plan d'ensemble de l'ouvrage (élévation et vue en plan)

2.3 Fondations et culées

Les deux culées reposent sur des fondations superficielles, réalisées avec un béton B35/25 RG, CP 325 kg/m³, et intégrées aux berges.

Le pilier central, également réalisé en béton armé, s'appuie sur une fondation soutenue par des pieux perforés Ø 100 cm et de longueur 10.0 m.

L'encastrement de la charpente métallique aux éléments d'appuis est réalisé à l'aide de barres en acier Inox 1.4462 nervuré ($f_{tk} = 750 \text{ N/mm}^2$, $f_{yk} = 850 \text{ N/mm}^2$).

2.4 Arcs



Figure 2.2: Structure porteuse principale en phase de montage

La géométrie des arcs s'inspire à la forme de l'ancien pont de Lavertezzo, caractérisée par une liaison de cercles en élévation.

Cette forme, constituée par des tubes (ROR 559.20) liés avec des soudures complètement pénétrées, ne suit pas la ligne de compression des forces et engendre ainsi des moments de flexion dans l'arc.

Des entretoises, nécessaires à la stabilisation horizontale de l'arc, sont placées avec un entre axe d'environ 8.0 m.

2.5 Tablier

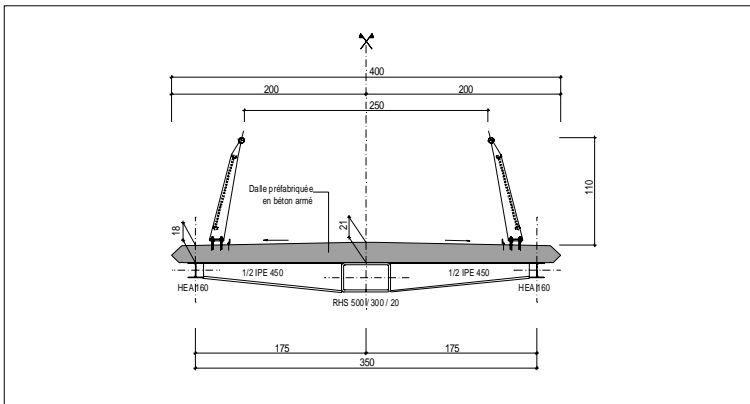


Figure 2.3: Coupe type



Figure 2.4: Vue en correspondance de la culée

Le tablier, en charpente métallique, d'une largeur entre axe de 3.50 m, est rectiligne en plan. Il présente une courbure vers le haut ($R = 1200$ m).

Deux poutres maîtresses (HEA 160/240) sont placées sur les côtés et suspendues aux tirants tous les 4.0 m. Elles sont tenues par soudure au système constitué des contreventements horizontaux et du profilé métallique central (RHS 500 x 300 x 20).

Des dalles préfabriquées (4.0 x 2.0 x 0.2 m) en béton armé (B40/30 RG, CP 325 kg/m³) s'appuient transversalement sur les poutres maîtresses et sont fixées au moyen de goujons dont l'évidemment est rempli avec du sable fin.

On a renoncé à la réalisation d'une connexion rigide (section mixte) entre les poutres maîtresses du tablier et les dalles en béton, pour améliorer le comportement dynamique de l'ouvrage.

Le but est ici de contribuer à une dissipation de l'énergie mais aussi de faciliter un démontage futur. Entre ces dalles, des joints étanches assurent un écoulement longitudinal des eaux météoriques.

2.6 Haubans

Les haubans (Type: Stahlton MZ 460) consistent en des barres en acier à haute résistance ($f_{tk} = 600$ N/mm², $f_{yk} = 500$ N/mm²) de diamètre 22 et 28 mm. Ils sont fixés à l'arc porteur ainsi qu'aux deux poutres maîtresses du tablier. La tension des haubans est contrôlée par des vérins hydrauliques.

2.7 Protection contre la corrosion

L'ensemble des éléments en acier est protégé comme suit:

- préparation de la surface Sa 2.5;
- couche de fond riche en zinc à 2 composants, à base de résine époxyde/polyamide, épaisseur 2x30 μ m;
- couche intermédiaire à base de résine époxyde à 2 composants, épaisseur 2x40 μ m;
- couche de finition à base de résine polyuréthane à 2 composants, épaisseur 60 μ m.

L'épaisseur totale de la protection contre la corrosion est donc de 200 μ m.

3. Comportement dynamique

Il est bien connu que les passerelles sont des structures sensibles au comportement dynamique.

Pour les analyses dynamiques on distingue deux types de sollicitations:

- celles induites par les usagers;
- celles induites par l'effet du vent.

3.1 Fréquences propres

Les fréquences propres de flexion de la passerelle ont été déterminées à l'aide d'un programme de calcul^①, tandis que la fréquence propre de torsion a fait l'objet d'un calcul à la main.

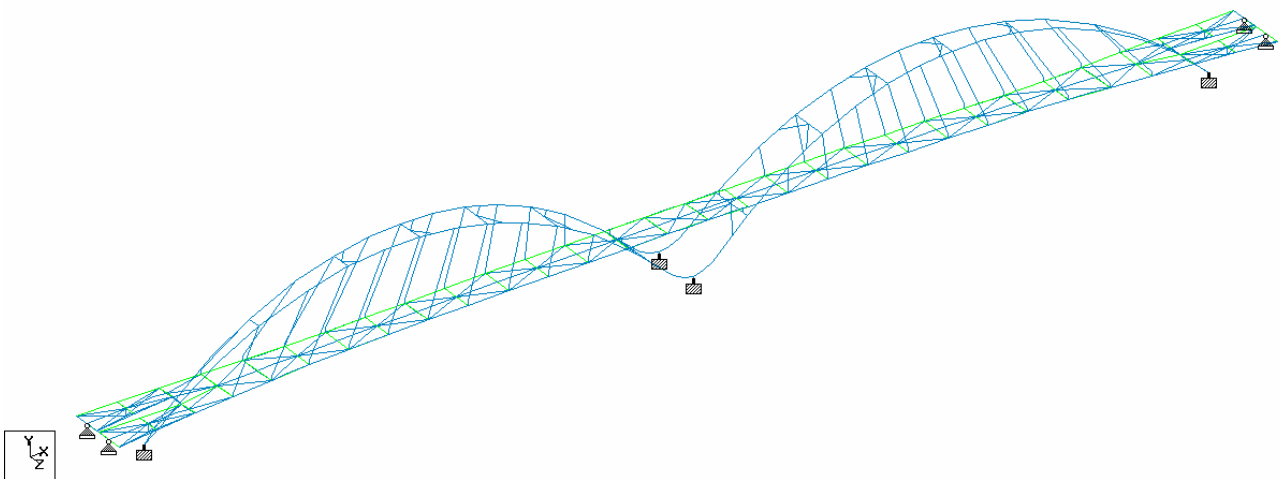


Figure 3.1: Model en EF^①

En synthèse, la première fréquence propre fondamentale verticale de flexion calculée, est de $f_{B1}^V = 1.28$ Hz. On se trouve donc, hors des domaines critiques que la norme SIA 160 (1989) recommande d'éviter.

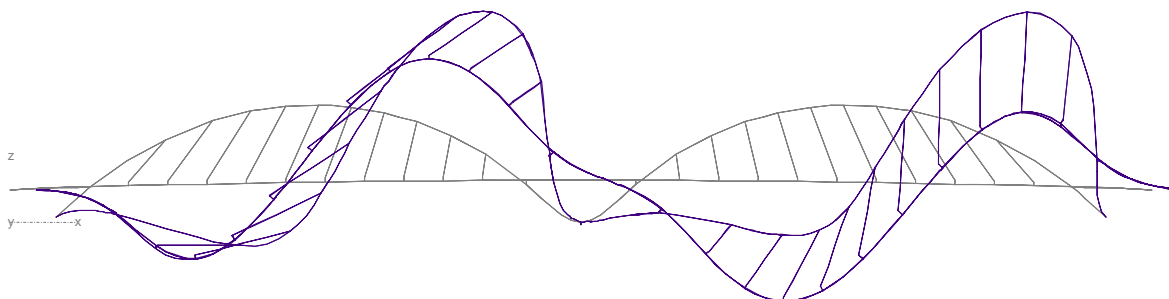


Figure 3.2: Mode d'oscillation: vue en élévation (1ere fréquence propre de flexion, $1 f_{B1}^V$, ampl. :200)

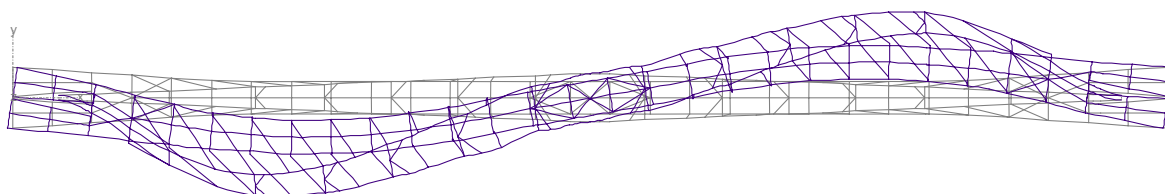


Figure 3.3: Mode d'oscillation: vue en plan (2eme fréquence propre de flexion, $2 f_{B1}^h$, ampl. :200)

En revanche, la deuxième fréquence de flexion verticale ($4 f_{B2}^V = 1.64$ Hz) se trouve dans le domaine sensible.

La première fréquence horizontale est de $2 f_{B1}^h = 1.33$ Hz. La fréquence propre de torsion calculée, est de $f_{T1} = 2.33$ Hz.

Le tableau suivant résume les principales valeurs calculées, ainsi que celles mesurées et traitées au § 4.

Fréq. propres	Calculées ^① (Hz)	Mesurées (Hz)	Différence Δ (%)
1 f_{B1}^V	1.28	-	-
2 f_{B1}^h	1.33	1.15	-13.5%
3 f_{B2}^h	1.49	-	-
4 f_{B2}^V	1.64	1.64	0.0%
5 f_{B3}^h	2.49	2.29	-8.0%
6 f_{B3}^V	2.50	-	-
7 f_{B4}^V	2.53	-	-
8 f_{B5}^V	2.61	2.56	-1.9%

^① calcul à l'aide du progr. "Statik 4" - Cubus AG (Zurigo)

Tableau 3.4: Résumé des fréquences propres calculées et mesurées

3.2 Vibrations induites par les usagers

Il s'agit, dans ce cas, d'évaluer les effets négatifs dus aux usagers.

Le calcul des fréquences propres montre qu'une seule fréquence verticale ($4 f_{B2}^v = 1.64$ Hz) est située dans le domaine critique impliquant des vérifications supplémentaires.

Dans ce sens, sont considérées les actions suivantes des usagers: la marche, la course et l'acte de malveillance (saut sur place).

Cette analyse théorique a permis de constater que, dans l'ensemble, il n'y a pas de risque de mise en résonance de l'ouvrage par l'utilisateur.

Par ailleurs, la première fréquence horizontale $2 f_{B1}^h = 1.33$ Hz se situe en dehors du domaine déconseillé: 0.6 - 1.2 Hz.

Concernant l'analyse du confort de l'utilisateur, la simulation numérique considère l'ouvrage soumis à l'action d'un piéton d'un poids de 80 kg ou de groupes de 4 à 10 personnes dans les différentes situations susmentionnées.

Certaines situations se révèlent être à l'origine d'accélération qui se situent en dessous des paramètres usuels ($a_{dyn} < 13\%$ de g), ce qui a conduit à prévoir la possibilité de poser des amortisseurs (Tilger) en différents endroits du tablier.

Dans le but de réduire l'effet des vibrations, en phase de projet a été étudié la possibilité de pose d'amortisseurs (Schwingungstilger) au niveau du tablier.

Ceci en particulier, pour la 8^{ème} fréquence propre verticale ($8 f_{B5}^v = 2.53$ Hz), avec un positionnement d'amortisseurs, situé au centre de la portée.

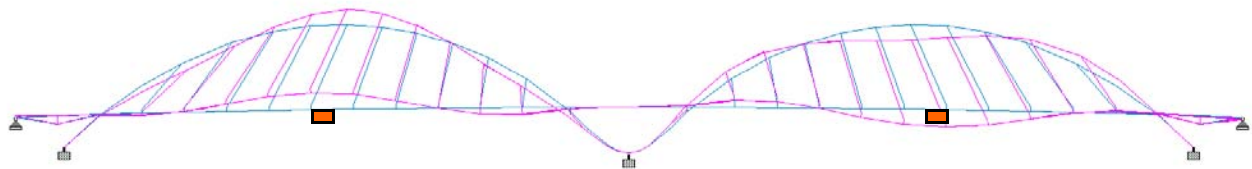


Figure 3.5: Positionnement des évidements pour les amortisseurs (prédisposition)

3.3 Effets induits par le vent

La stabilité aérodynamique de la passerelle est influencée par l'action du vent entraînant les phénomènes suivants:

- échappement tourbillonnaire: "vortex shedding"
- instabilité dynamique: "flottement" ("flutter")
- instabilité statique: "galloping"

et qui ont été l'objet de vérifications théoriques.

En résumé, la vitesse critique du vent est supérieure pour le phénomène du "galloping", face à celle du "flottement".

La mise en résonance des haubans ne pose pas de problèmes particuliers. Il en est de même des effets physiologiques référés aux accélérations du mouvement.

4. Essais dynamiques

Le but de ces essais est de déterminer les principales caractéristiques dynamiques de l'ouvrage, c'est-à-dire les principales fréquences propres de flexion et de torsion.

La campagne de mesures et d'analyse [1,2], développée en étroite collaboration avec le bureau "Ziegler Consultants" et dont la synthèse des résultats sont repris ci-après, a été menée en deux situations distinctes: sans et avec le garde-corps latéral.

4.1 Système de mesure

La méthode d'essai utilisée est extrêmement simple et nécessite peu de temps pour sa mise en place.

Les instruments de mesure (accéléromètres triaxiaux, capteurs absolus de vitesse et de déplacement) ont été disposés sur les deux poutres maîtresses au bord et au milieu de la section transversale.

La comparaison entre les valeurs calculées et les résultats, est résumée au tableau § 4.6.



Figure 4.1: *Appareils de mesures*

4.2 Programme de mesures

Sont exécutés trois genre d'excitation:

- "ambient vibration"
- "excitation harmonique"
- "excitation avec des personnes"

4.3 Points de mesure

Les mesures ont été effectuées aux lieux suivants :

- pour "l'ambient vibration": aux 7 points MP1 à 7
- avec "l'excitation dynamique": au point MP2
- pour les mouvements induits par les personnes: aux points MP2/MP3.

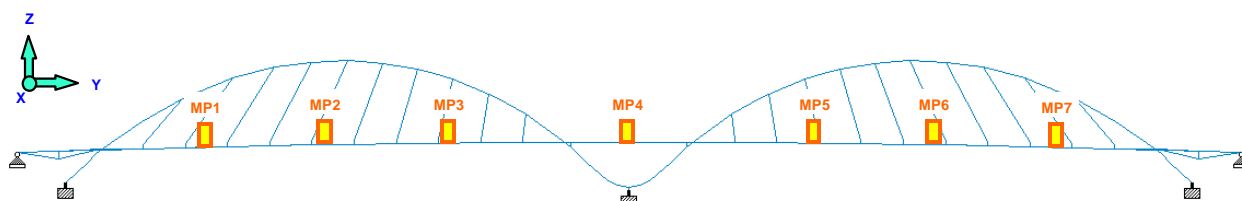


Figure 4.2: *Positionnement des points de mesure*

4.4 Synthèse des résultats de mesure (sans garde-corps)

1. AMBIANT VIBRATION (Hintergrund-Anregung)

- . Fréquences verticales principales: 1.64 Hz, 2.22 Hz, 2.56 Hz
- . Fréquences transversales: 1.15 Hz, 2.29 Hz



Figure 4.3: Capteur de vitesse et de déplacement / accéléromètre triaxial / excitateur

2. EXCITATION HARMONIQUE (Harmonische Anregung)

Avec un excitateur (APS 400) électrodynamique on peut estimer la courbe de résonance du point MP2, concernant les oscillations verticales. Les fréquences fondamentales se situent entre 2.28 et 2.62 Hz. Ces valeurs correspondent bien avec les 2ème et 3ème fréquences dominantes, déterminées en situation de "ambient vibration".

Resonance Plot

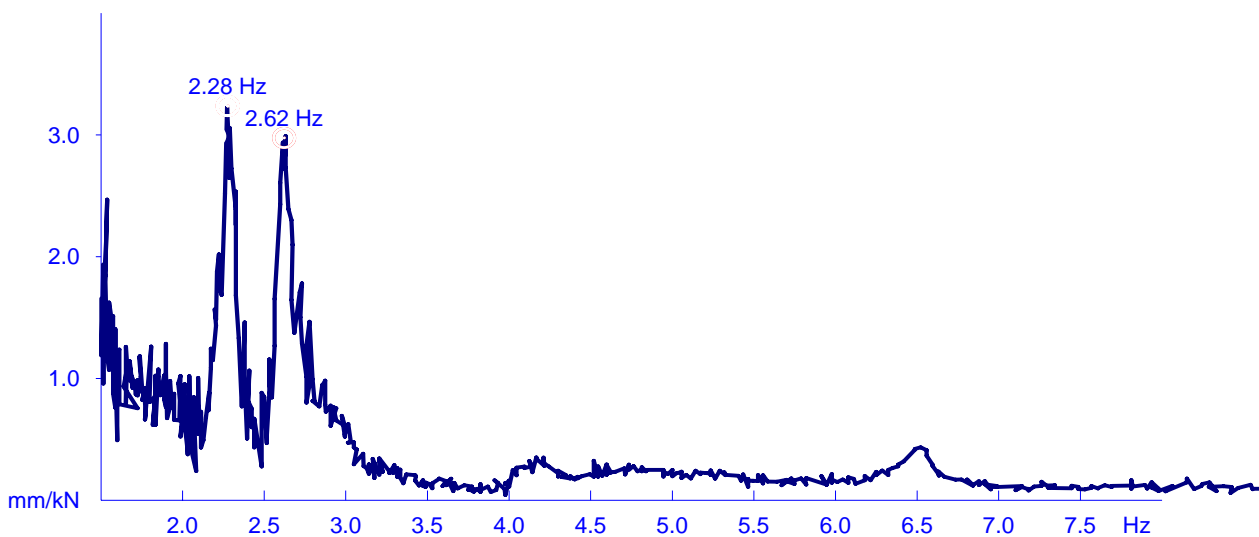


Figure 4.4: Courbe de résonance pour MP2; direction verticale

3. EXCITATION AVEC DES PERSONNES

Elle consiste à faire sauter sur place une personne d'environ 80 kg et à mesurer les vitesses et accélérations verticales et horizontales, en un point représentatif de l'ouvrage. Ci-après sont résumées les valeurs mesurées au point MP2.

Nombre personnes	Genre d'excitat.	Fréq. excit. (Hz)	a_{max} (m/s ²)	
			Vert.	Horiz.
10	marche	1.64	0.19	0.03
10	course	2.56 1.64 et 2.56	1.54 0.37	0.11 0.05
4	course	2.56	0.78	0.05
4	sauter	1.64 et 2.56 2.20 1.64, 2.2 et 4.10	0.33 1.45 0.79	0.04 0.11 0.14

Tableau 4.5: Synthèse des accélérations mesurées au point MP2

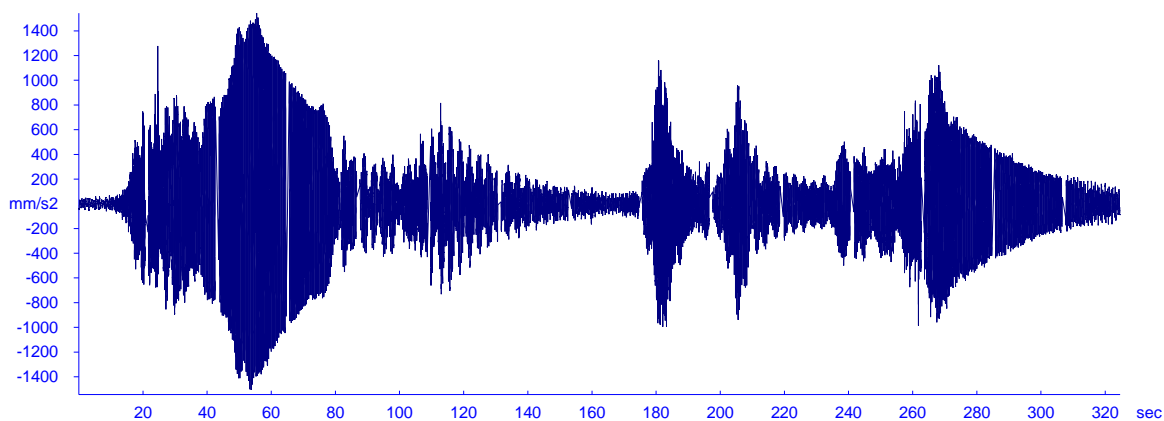


Figure 4.6: Développement de l'accélération (cas de 10 personnes qui courent)

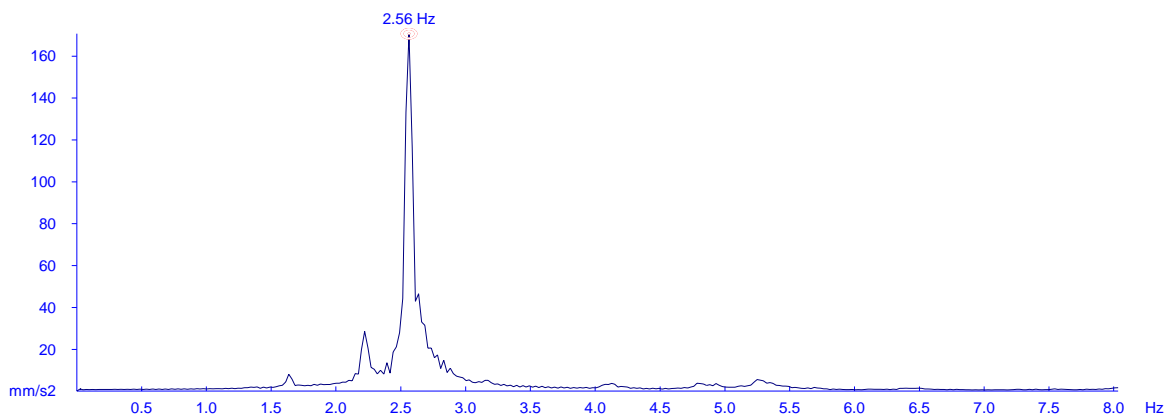


Figure 4.7: Spectre d'amplitude concernant la figure 4.6

4.5 Amortissement

La figure suivante montre le spectre d'oscillation pour le cas "saut sur place", avec l'amortissement des vibrations verticales de la passerelle; l'amortissement se situe env. à 0.3%.

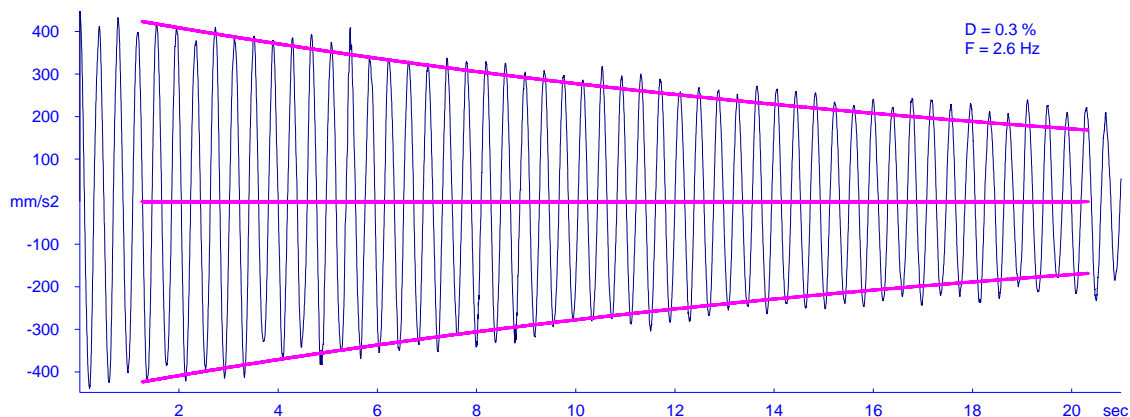


Figure 4.8: Estimation de l'amortissement

4.6 Evaluation de l'influence du garde-corps latéral

Dans le but d'estimer l'influence de la présence des garde-corps sur les fréquences propres, ainsi que l'effet d'amortissement, une campagne de mesures a été menée après la pose des garde-corps. Les valeurs sont résumées ci-après.

Fréquences mesurées		Garde-corps		Différence Δ (%)
		sans	avec	
Vertical	f_{B1}^v	1.64	1.71	+4.0%
	f_{B2}^v	2.22	2.49	+12.0%
	f_{B3}^v	2.56	2.64	+3.0%
Horizontal	f_{B1}^h	1.15	1.37	+22.0%
	f_{B2}^h	2.29	-	

Tableau 4.9: Résumé des fréquences propres "sans et avec" garde-corps latéral, mesurées

On remarque que les garde-corps influencent surtout les fréquences horizontales; ce qui amène à une amélioration du comportement (domaine critique: 0.6 - 1.2 Hz).

L'amortissement n'est pas changé.

5. Comparaison avec d'autres ouvrages semblables

Pour compléter l'évaluation des vibrations, des ouvrages semblables ont été pris en considération sans ou avec amortisseurs (Tilger); en particulier:

1. passerelle piétons (Zürich): amortisseur installés par "Ziegler Consultants"
2. pont haubané: données: "SIA - Documentation D 0138"; page 45 u.ff.
3. passerelle piétons / cyclable (Biel): données: "SIA - Documentation D 0138"; page 47 u.ff.
4. passerelle piétons (Lausanne): mesures effectuées par "Ziegler Consultants"
5. passerelle piétons (Winterthur): mesures effectuées par "Ziegler Consultants"

La tableau suivant résume les caractéristiques principales des ouvrages considérés:

No	Type	Matériel	Portée (m)	Fréquence fond. (Hz)	Amortissement (%)
1	poutre continue sur 3 appuis	construction métallique	30	2.7	0.9
2	pont haubané	caisson en acier	30-45	2.12	1.0
3	poutre continue sur 3 appuis	béton précontraint	28-34-28	2.9	1.1
4	poutre continue sur 3 appuis	construction mixte	53	2.5	0.9
5	poutre continue sur 2 appuis	construction mixte	62 / 43	1.5 / 2.9	0.7

Tableau 5.1: Données caractéristiques des ouvrages considérés

Le graphique suivant, résume les accélérations mesurées des différents ouvrages en comparaison avec la passerelle sur la Verzasca.

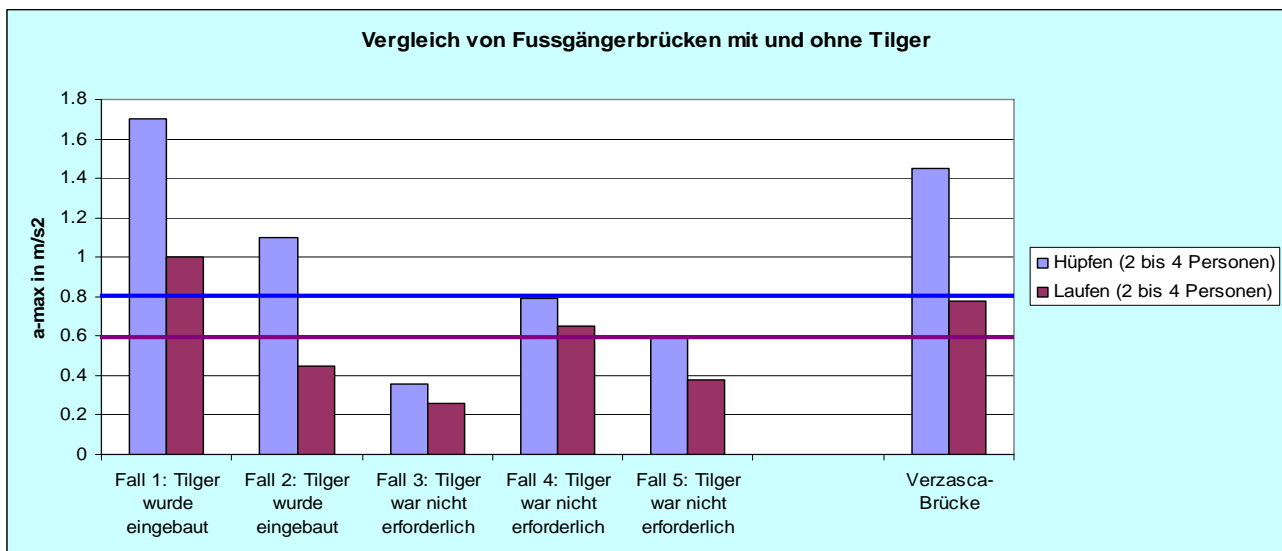


Figure 5.2: Comparaison de ponts piétons "avec ou sans" amortisseurs

Le tableau ci-dessus montre qu'une accélération de 0.6 m/s^2 est atteinte dans le cas où 2 à 4 personnes marchent; tandis que 0.8 m/s^2 est atteint lorsque 2 à 4 personnes sautent. Ce qui représente le domaine habituellement toléré.

En général, pour des situations avec des valeurs supérieures, il faut planifier la possibilité de poser des amortisseurs (Tilger).

6. Conclusions

La passerelle sur la Verzasca a fait l'objet de mesures dynamiques *in situ* pour contrôler son comportement dynamique et surtout pour vérifier les approches théoriques.

Les mesures des fréquences propres verticales en flexion (1.64 et 2.56 Hz) sont très proches de celles évaluées avec un calcul par EF (1.64 et 2.61 Hz).

Les mesures montrent toutefois une fréquence à 2.22 Hz, qui ne résulte pas du calcul.

Les mesures des fréquences propres horizontales (1.15 et 2.29 Hz) sont plus basses que celles calculées (1.33 et 2.49 Hz). Le calcul montre également ici une fréquence à 1.49 Hz, qui ne résulte pas des mesures.

Ces différences peuvent aussi s'expliquer par le fait que les dalles préfabriquées n'étaient pas, au moment des mesures, liées à la charpente métallique du tablier.

La dissipation d'énergie due au frottement entre les dalles en béton et la structure du tablier est insignifiante et n'a pu être mise en évidence.

L'effet des garde-corps a démontré une certaine influence positive, uniquement pour les vibrations horizontales.

En accord avec le maître de l'ouvrage et après quelques mois de la mise en service, il a été décidé de renoncer à la pose d'amortisseurs (Tilger), vu la complète satisfaction par les usagers. Ceci est d'autant plus justifié que l'ouvrage présente, selon les études théoriques et les mesures *in situ*, un bon comportement pour ce qui concerne les effets dynamiques induits par les usagers piétons.

Références bibliographique:

- [1] Dr. A. Ziegler, Ziegler Consultants (Zurigo)
Schwingungsmessungen auf der Passerella sulla Verzasca - 07.06.04
- [2] Dr. A. Ziegler, Ziegler Consultants (Zurigo)
Schwingungsmessungen auf der Passerella sulla Verzasca
Bestimmung des Einfluss des Brückengeländers - 18.11.04

Remerciements:

Les meilleurs remerciements vont a:

- M. Prof. H. Bachmann (Zurich)
- M. Ing. P. Gorgé (Bureau GVH - St. Blaise)
- M. Dr. A. Ziegler (Zurich)

pour leur contribution à ce projet, ainsi qu'à mon proche collaborateur ing. L. Humair.

Auteur:

Giorgio Masotti
Ing. civ. dipl. EPF-Lausanne
Bureau d'étude
6501 Bellinzona (TI) - Suisse
e-mail: info@masotti.ch