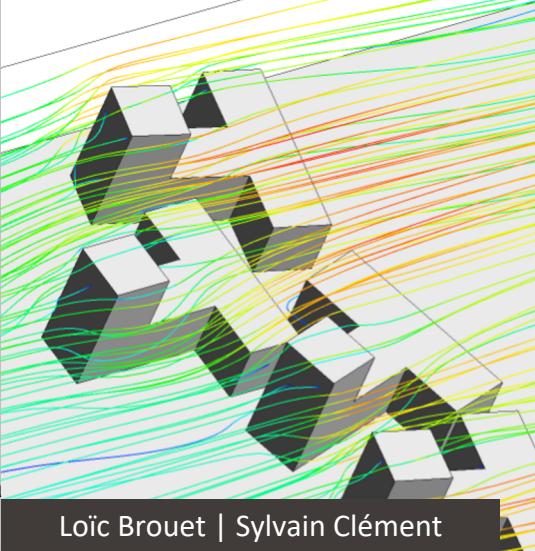


Collaboration avec:
Laboratorium3D



Encadrant externe:
Christian Tognacca

Encadrant interne:
Hendrik Huwald



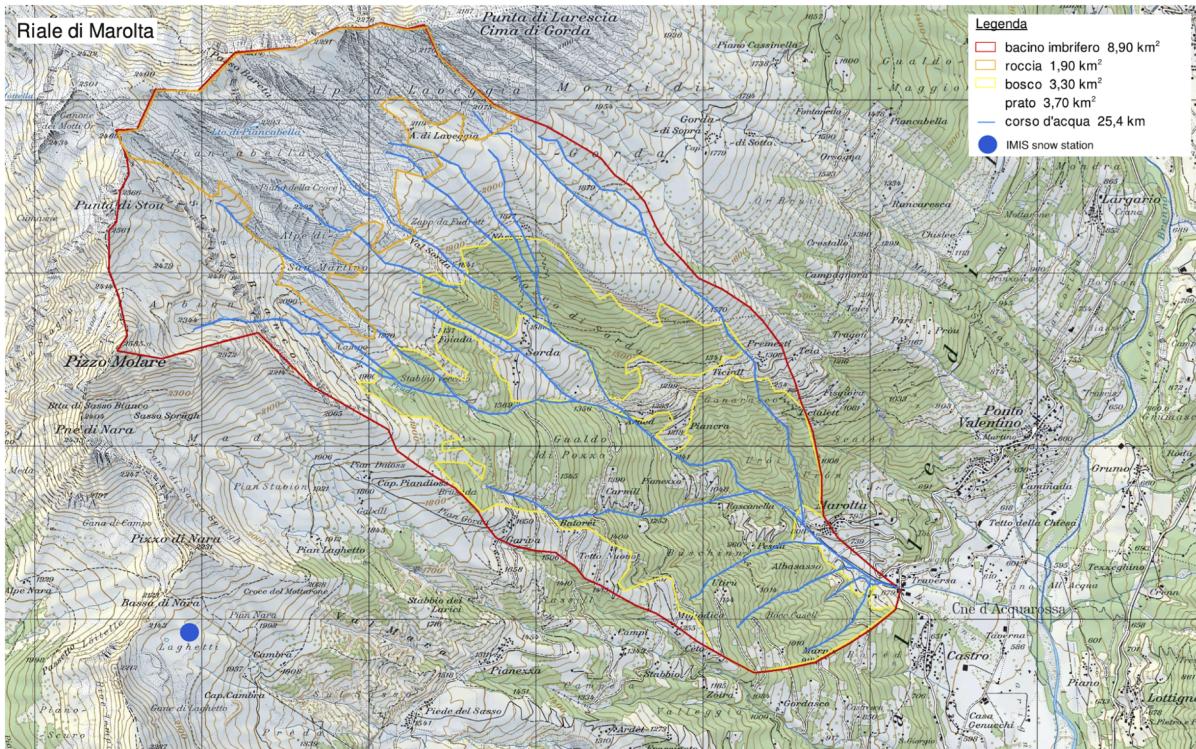
Loïc Brouet | Sylvain Clément

Stabilisation du lit d'un torrent de montagne à l'aide de blocs naturels et/ou de tétrapodes

Février - Juin 2020

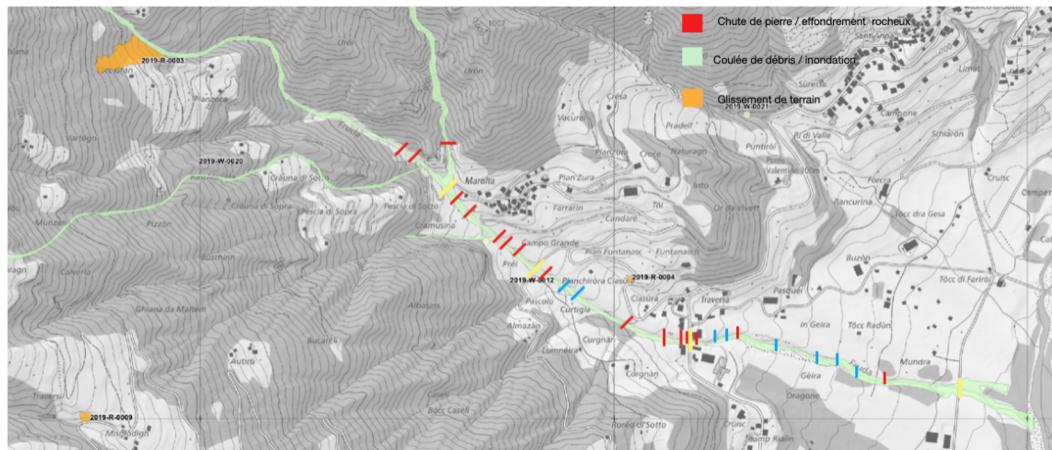
- Contexte de l'intervention de stabilisation
- Section du torrent à stabiliser
- Pré-dimensionnement théorique
- Essais sur le modèle physique
- Simulations numériques
- Aspects non techniques
- Proposition d'une solution de stabilisation
- Perspectives et continuation

Torrent Fruda et son bassin versant

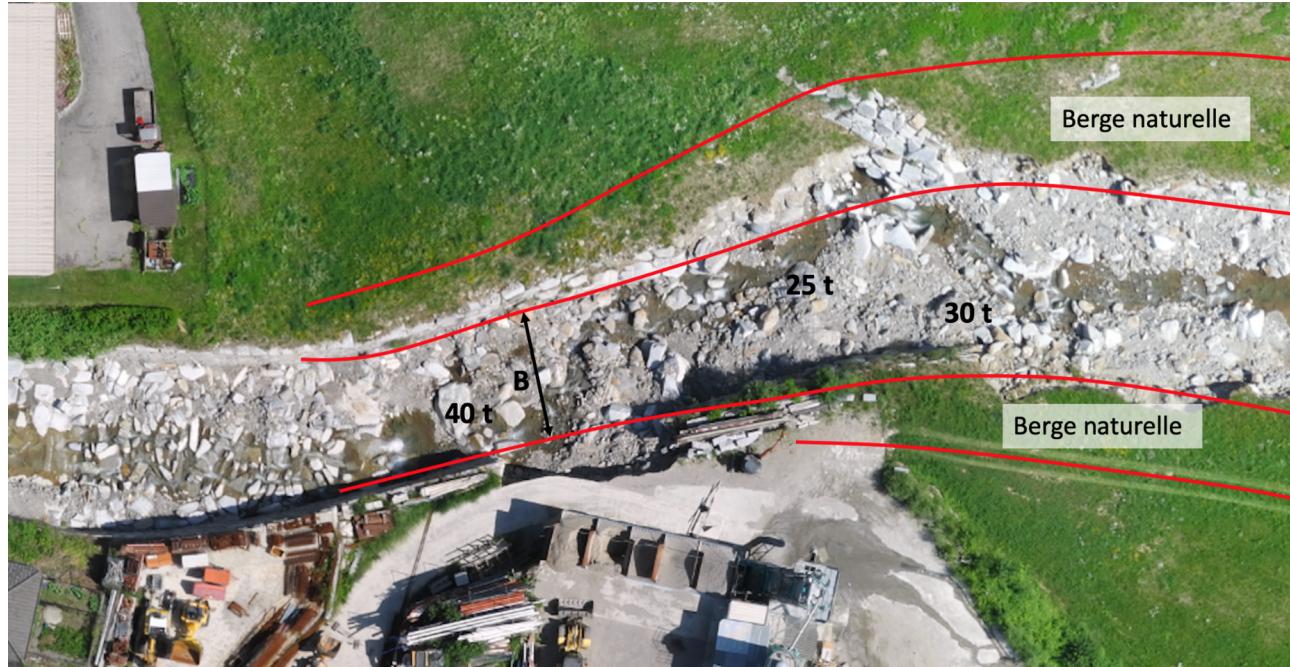


source: Beffa & Tognacca

Événement de précipitations intenses - Juin 2019



Section de la Fruda à stabiliser



- $B = 10..15 \text{ m}$
- $J = 13\%$
- $L = 90 \text{ m}$
- $Q_{\text{dim}} = 50 \text{ m}^3/\text{s}$

Pré-dimensionnement théorique

Tétrapodes (type CAB)

Débit critique (Bezzola, 2005):

$$Q = 0.4 \cdot B \cdot J^{-\frac{1}{3}} \sqrt{g(s-1)V} \cong 65 \text{ m}^3/\text{s}$$

Vitesse critique (Bezzola, 2005):

$$U_c = 0.9 \cdot \sqrt{g \frac{V}{A}} \cong 3.3 \text{ m/s}$$

$$Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}, B = 11 \text{ m}, J = 13\%, s = 2.65$$

Rampe en blocs naturels

Diamètre bloc (Whittaker and Jäggi, 1986):

$$\frac{Q}{\sqrt{g(s-1)d_{65}^3}} = B \frac{0.257}{J^{\frac{7}{6}}} \quad d_{65} = 0.55 \text{ m}$$

Granulométrie selon Weichert (2006):

$$d_{max} = 2.4 \text{ m}$$

Pré-dimensionnement théorique

Solution hybride:

Tétrapodes (d_{max}) + blocs naturels (d_{84} et d_{90})

d_{16}	d_{50}	d_m	d_{84}	d_{90}	d_{max}
10.6 cm	32.0 cm	55.4 cm	101.5 cm	139.1 cm	240.1 cm

Distribution granulométrique du matériau d'apport pour la *Fruda* selon Weichert (2005)

masse des éléments:

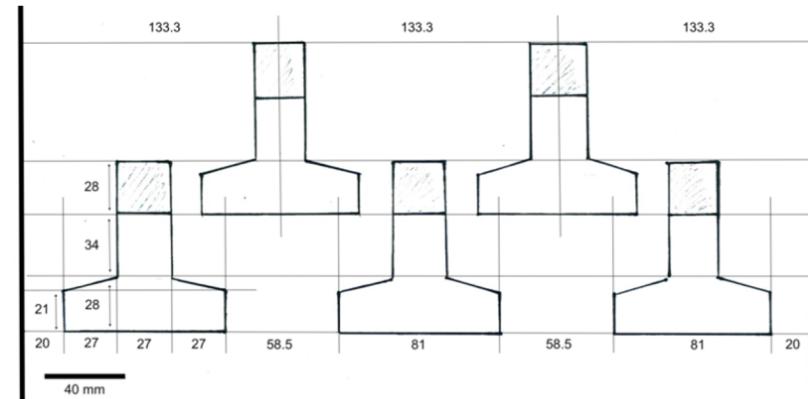
Tétrapodes: ~10 tonnes / Blocs naturels: ~1.5 tonnes et ~4 tonnes

Disposition des éléments:

Tétrapodes en traverses et blocs entre les traverses

- **Maquette Laboratorium 3D:** Longueur = 6 m, largeur = 0.4 m, pente jusqu'à 25 %, débit jusqu'à 160 l/s, représentative de la *Fruda* à l'échelle 1:30
- **Tests phase A:** solution de stabilisation hybride, tétrapodes en traverses dont la densité varie avec gros blocs entre, pente de 13 %, débit variant, granulométrie calculée selon Weichert (2005)

	Test 1	Test 2	Test 3
Tétrapodes par traverses	5	6	6
Espacement des traverses	60 cm	50 cm	50 cm
Nombre de traverses	7	9	9
Densité [pc/m ²]	21	30	30
Apport en blocs naturels	14 x 1.5 t	15 x 1.5 t	15 x 1.5 t
	10 x 4 t	11 x 4 t	

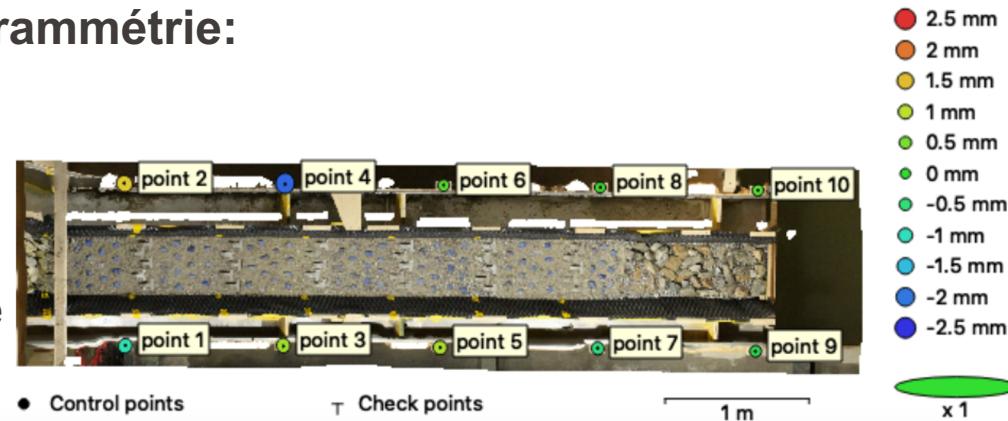


Objectifs des tests:

- proposer une solution de stabilisation optimale pour la *Fruda* (phase **A**)
- analyser la stabilité des tétrapodes dans des situations à forte pente (phase **B**)
- analyser l'effet de la densité et de la disposition des tétrapodes (phases **A et B**)
- vérifier la conformité des résultats expérimentaux aux résultats théoriques (Bezzola, Weichert) (phases **A et B**)

Méthode d'observation par photogrammétrie:

- photos de la maquette au zénith
- points de calage sur la maquette référencés dans un système de coordonnées locales
- reconstruction 3D de la maquette avec Metashape Pro



Rapport de qualité, test1 (MetashapePro)

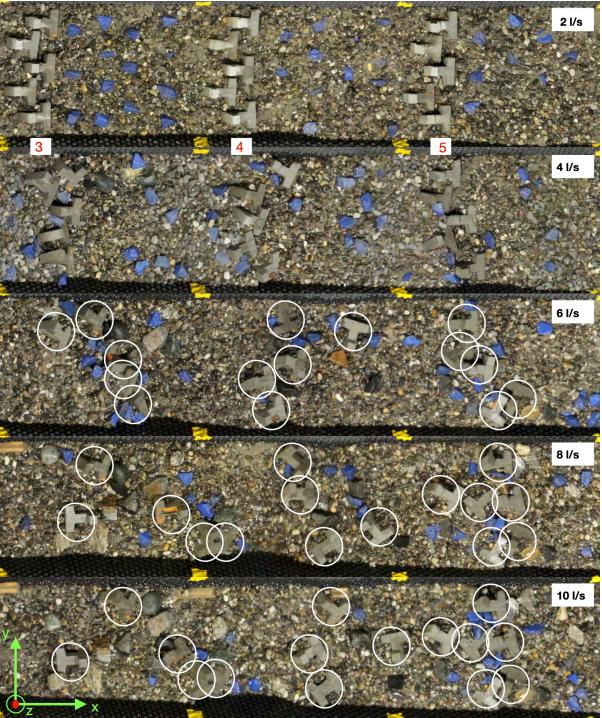
Essais sur le modèle physique

Test 3

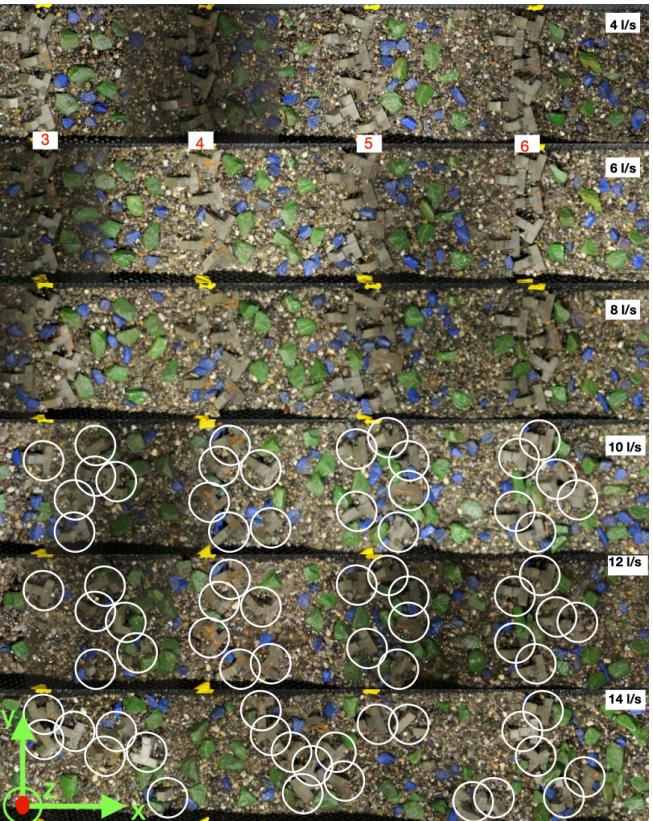
10

- Comparaison des tests sur orthophotos

Test 1

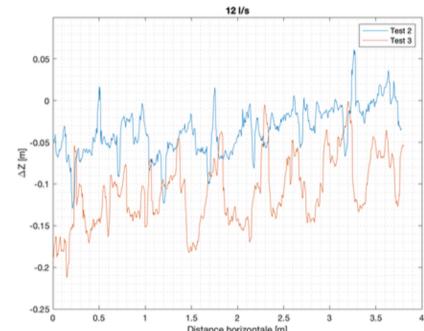
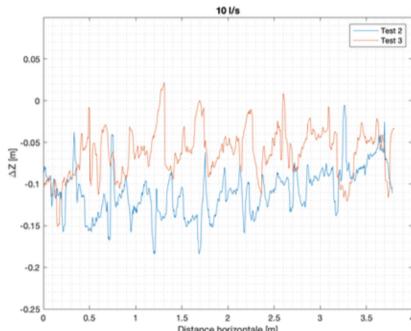
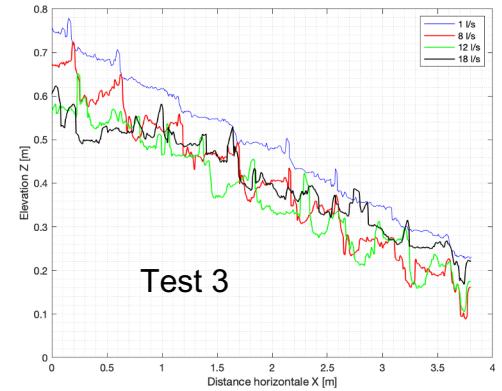
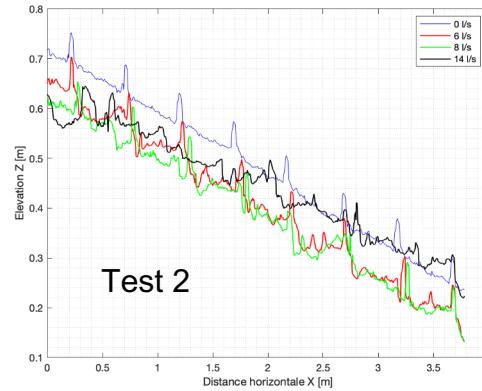
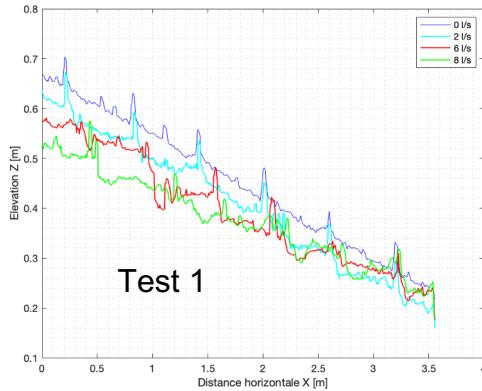


Test 2



Essais sur le modèle physique

- Comparaison des tests sur DEM (Digital Elevation Model)



(a) Différence ΔZ entre le MNT à 0 l/s et le MNT à 10 l/s des tests 2 et 3.

(b) Différence ΔZ entre le MNT à 0 l/s et le MNT à 12 l/s des tests 2 et 3.



source: Laboratorium 3D

Essais sur le modèle physique

- Loi de similitude de Froude:

$$F = \frac{U}{\sqrt{gL}}$$

Facteur d'échelle		
Géométrie	Vitesse	Débit
$\Omega = \frac{L_P}{L_M} = \frac{B_P}{B_M} \approx 30$	$U_P = \Omega^{1/2} U_M \approx 5.48 U_M$	$Q_P = \Omega^{5/2} Q_M \approx 4930 Q_M$

- Évaluation de la vitesse:



Arrêt sur image d'une vidéo avec traceurs flottants (source: Laboratorium3D)

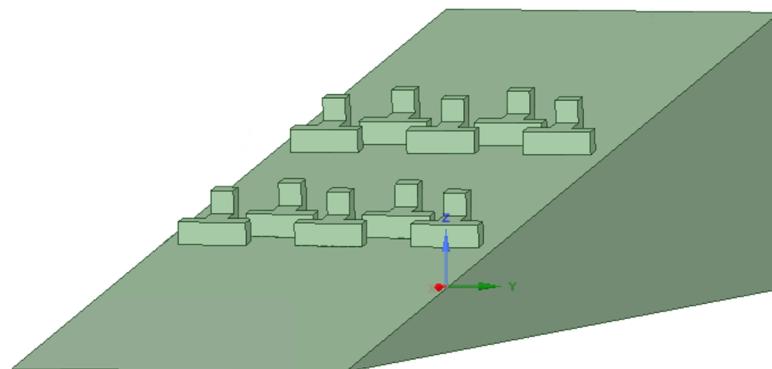
Débit modèle physique [l/s]	Débit <i>Fruda</i> [m ³ /s]	Vitesse modèle physique [m/s]	Vitesse <i>Fruda</i> [m/s]
6	30	0.62	3.37
8	40	0.72	3.92
10	50	0.88	4.82
12	60	1.06	5.81
14	70	1.60	8.76

- Résumé des principales observations:

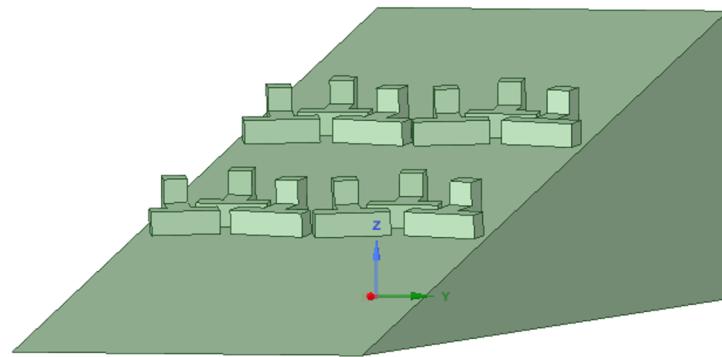
	Test 1	Test 2	Test 3
Tétrapodes par traverse	5	6	6
Espacement des traverses [cm]	60	50	50
Densité [pc/m^2]	21	30	30
Apport en blocs naturels	14x 1.5t 10x 4t	15x 1.5t 10x 4t	15x 1.5t 11x 4t
Débit initiation de mise en mouvement [l/s]	4	6	8
Vitesse d'initiation de mise en mouvement [m/s]	-	-	3.98
Débit du premier basculement [l/s]	6	10	10
Débit critique [l/s]	8	12-14	14
Débit max atteint [l/s]	10	14	18
Distance moy. parcourue par tétrapodes @ 6 l/s [cm]	20	0	0
Distance moy. parcourue par tétrapodes @ 10 l/s [cm]	40	20	10
Distance moy. parcourue par tétrapodes @ 14 l/s [cm]	-	40	40
Distance moy. parcourue par tétrapodes @ 18 l/s [cm]	-	-	60
Bloc naturels freinent tétrapodes	non	oui	oui
Morphologie step-pool jusqu'au débit [l/s]	6	12	12-14
Rupture brusque de certaines traverses	non	non	oui
Pente initiale	13%	13%	13%
Pente finale	9%	9%	10%
Comparaison au débit critique de Bezzola*	<<	<	\leq
Comparaison à la vitesse critique de Bezzola*	-	-	>
Performance pour garantir l'objectif de protection (10 l/s)	insuffisante	suffisante +	suffisante -

Simulations numériques 3D

- Modèle numérique TRÈS idéalisé
- Effet de l'organisation interne des traverses sur l'écoulement
- Simulation des test 1 et 2 (10 l/s)



Traverses similaires au test 1



Traverses similaires au test 2

Effet de l'organisation interne des traverses sur l'écoulement

Velocity

1.12

0.84

0.56

0.28

0.00

$[m s^{-1}]$

Velocity

1.12

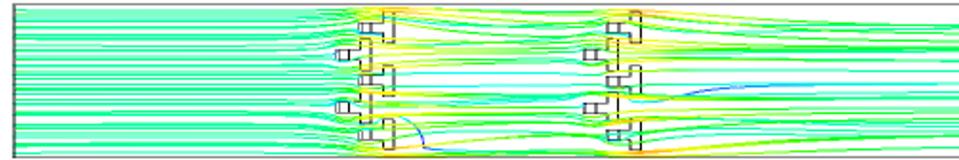
0.84

0.56

0.28

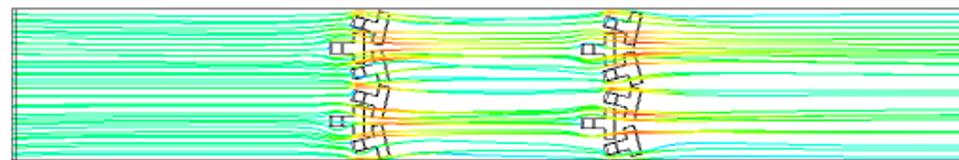
0.00

$[m s^{-1}]$



simulation du test 1

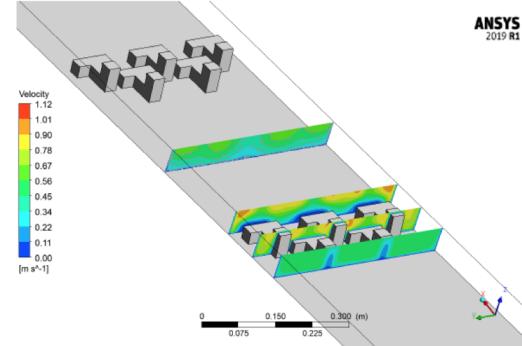
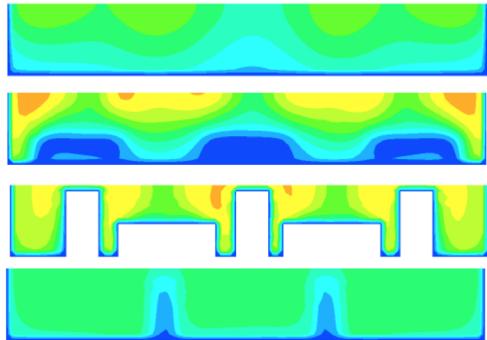
Moins favorable du point de vue de la stabilité et de la protection des berges.



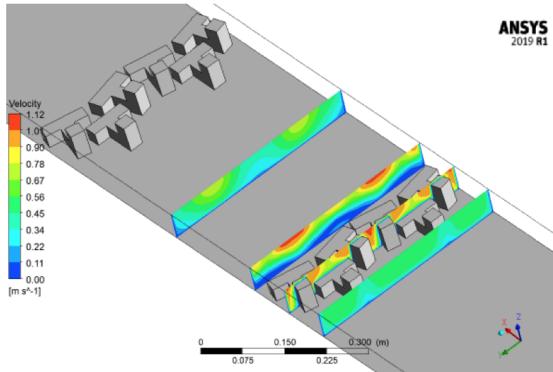
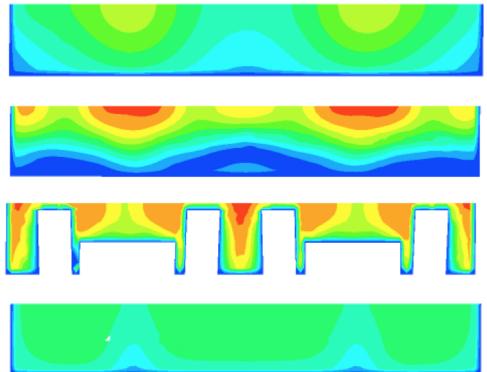
simulation du test 2

Concentration de l'écoulement au centre, jugée plus favorable !

Effet de l'organisation interne des traverses sur l'écoulement



simulation du test 1



simulation du test 2

Coûts

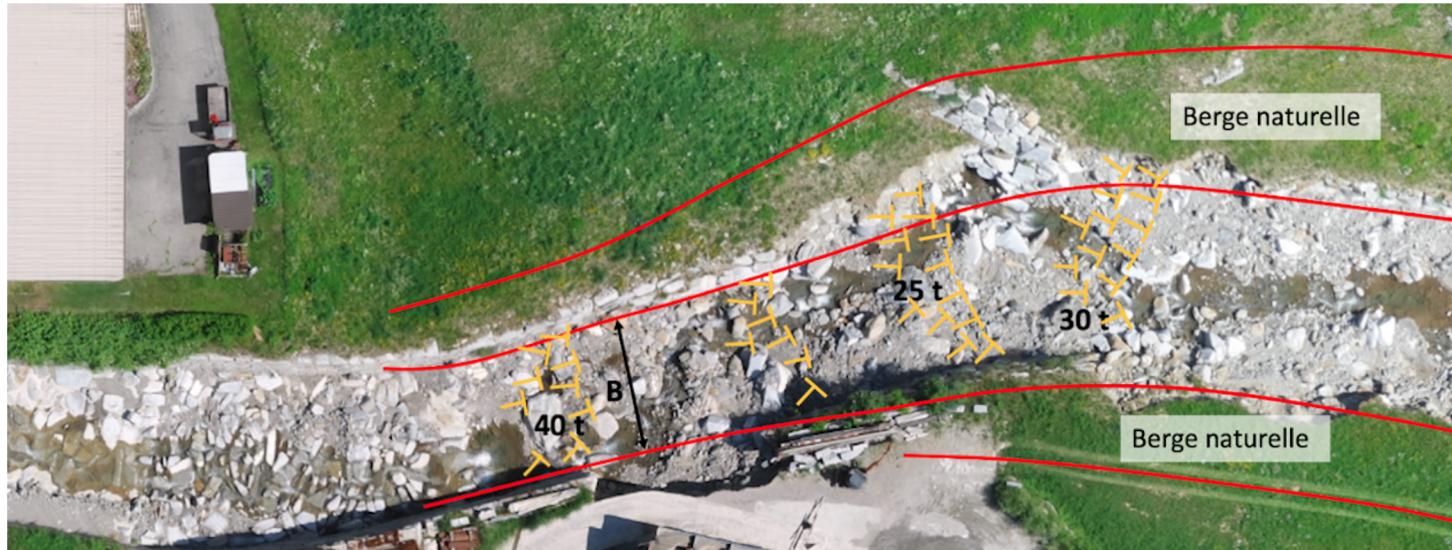
- Indisponibilité de gros blocs aux alentours pour un coût acceptable
- Solution hybride: ouvrage dynamique, évite une rupture abrupte
- Coût d'un tétrapode: 5000 CHF seul et 10'000 CHF tout compris

Confrontation des variantes multi-critère

	Gros blocs seuls	Tétrapodes seuls	Solution hybride
Performance technique	+	+	++
Coût	-	+	+
Impact écologique	+	+	+
Impact paysager	+	-	-
Performance multi-critère	-	-	+

Proposition d'une stabilisation pour la Fruda

- Utiliser l'appui et la protection des 3 très gros blocs (40 t, 25 t, 30 t)
- Analogie au modèle physique: 1 traverse/15m, en 2 lignes sans contact
- A partir de la modélisation: blocs à côté des rives tournés vers l'intérieur pour éviter leur érosion



source: Beffa & Tognacca, adapté

- Tests phase B: Effet de l'organisation interne des traverses et de la pente (15, 20 et 25 %)
- Mesures de vitesses et de hauteur d'eau sur le modèle physique
- Développement d'un modèle de simulation numérique bi-phasique avec une géométrie basée sur le MNT
- Simulation de la solution proposée avec une géométrie correspondant au cas réel

- La solution hybride est la plus performante (limitation des coûts et de l'impact paysager, bonne performance de stabilité et de réduction de l'érosion). Éviter les structures de traverse trop rigides !
- Avantages et inconvénients de ne pas faire les tests soi-même
- Analyse par photogrammétrie très efficace
- Les traceurs flottants apportent des éléments intéressants
- Comportement des tétrapodes similaire à l'estimation selon Bezzola (2005) en ordre de grandeur. Mesures de vitesses nécessaires pour une analyse plus détaillée



Questions ?

Merci pour
votre
attention !