



DolmEn

Développement d'Outils et de Logiciels
pour la Maçonnerie Existante et Neuve

Les premières réflexions

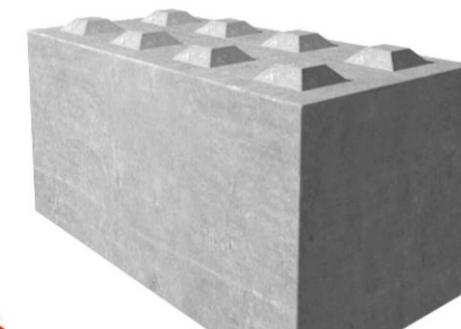
L'organisation du chargement et de l'organisation dans un délai contraint

Le déroulement, les décisions et la fin

Les premières réflexions

Mars 2023

- Concentrées sur la voûte et son comportement sous chargements (sujet DOLMEN):
 - . Comment la charger (eau, convois, autres...)
 - . Définir les investigations préliminaires sur les matériaux et la géotechnique
 - . Que cherche t on à comprendre ou confirmer? Que veux t on mesurer? Comment?
 - . Quels délais pour le déroulement du programme?
 - . Quel coût d'objectif?
 - . Impératif:achever l'opération avant les crues du SAISON début octobre
- **Premiers calculs avec « voûte » :** la sécurité de la voûte est largement assurée quelles que soient les chargements routiers imaginés.
- Il faut alors imaginer des chargements très lourds, et après échanges avec le CD 64 l'usage de blocs de bétons dit BBLOCS semblait être une solution efficace et accessible.

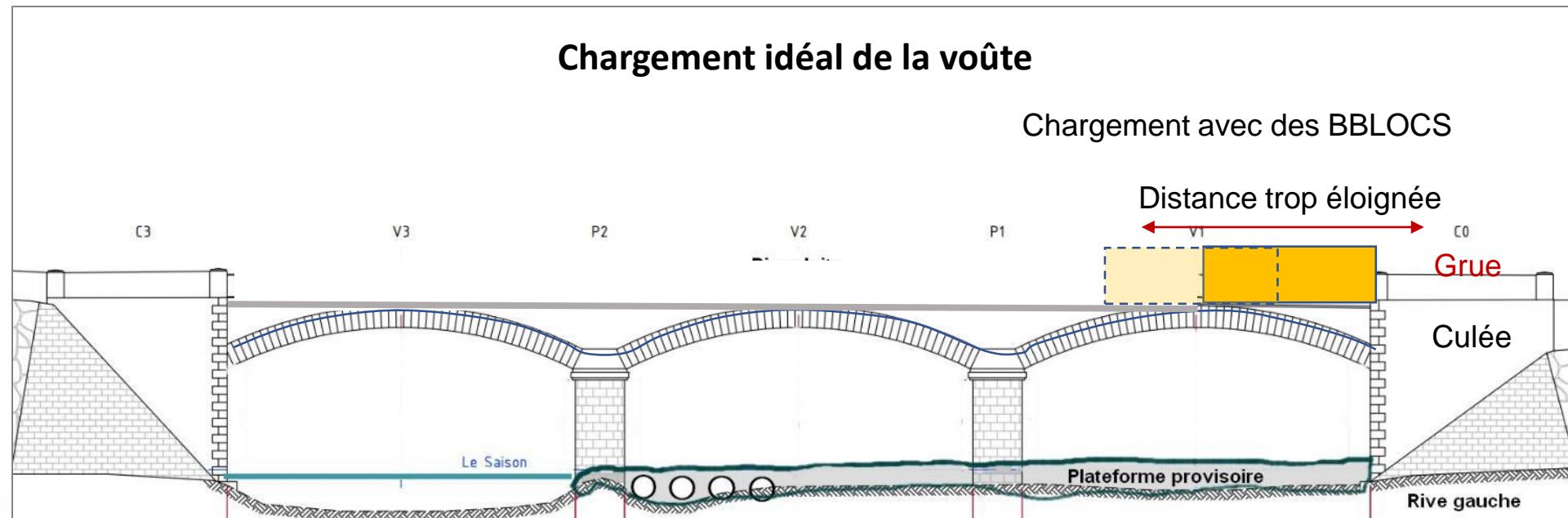


2,4 T le bloc de 1,6 x 0,8 x 0,8 m
Manutention facile
Sécurité des assemblages et empilages

Les premières réflexions

Mars 2023

- D'autres calculs sont rapidement réalisés avec « voûte » avec l'usage de ces blocs empilés sur plusieurs étages sur toute la largeur du pont.
- Le positionnement des charges centrées sur la voûte V1, accessible par la rive gauche, devait générer le plus de sollicitations dans la voûte, mais ne pouvait pas être mis en œuvre pour des raisons de limite de la grue destinée à la pose, et de sécurité en cas d'effondrement



Les premières réflexionsAvril 2023

- L'implantation du chargement sur la demi travée V1 RG s'impose, et les calculs sont repris rapidement avec des hypothèses initiales non encore validées par des investigations:
 - . Issues d'archives (répertoire PetC carrières 1889) sur la résistance de la pierre
 - . Issues des méthodes de calcul des voûtes du 19 ème siècle (CROIZETTE DENOYER)

Répertoire carrière 1889

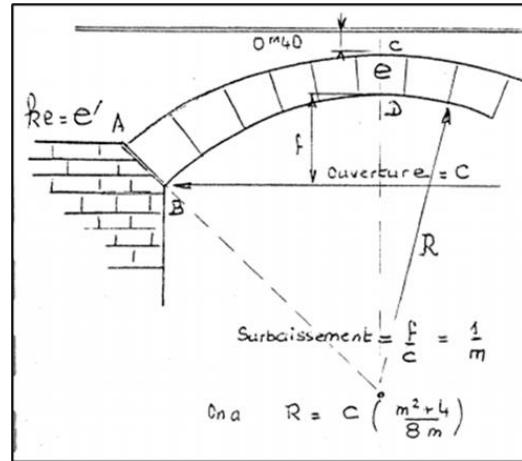
CARRIÈRES DE PIERRE DE TAILLE							
DÉSIGNATION des CARRIÈRES et des communes où elles sont situées.	NOMS des EXPLOITANTS.	GARES et PORTS d'expédition.	PRIX COURANT du MÈTRE CUBE sur carrière en gare ou au port	MODE d'EXPLOITATION.	MASSE EXPLOITÉE — NOMBRE et hauteur des bancs.	DÉSIGNATION usuelle de la PIERRE.	NATURE de la PIERRE — Position géologique de la carrière.
Commune de Narb. Carrière Barrère.	Lasalle-Barrère.	Gares de Sauveterre, 11 kil. et d'Orthez, à 25 kil.	50 Fr. 65 à 75 Fr.	A ciel ouvert. — Mine, pince, coin.	Découvert : 4 ^m 50. Masse de 8 ^m , en 15 bancs de 0 ^m 30 à 0 ^m 30, inclinés à 45°.	Pierre de Las.	Calcaire compacte, blanc mat, à grain et régulier, ou grès à poudingue, forme, à grain irrégulier. (Terrain crétacé).

DÉPARTEMENT DES BASSES-PYRÉNÉES							
Nombre des essais.	RÉSISTANCE A L'ÉCRASEMENT par centimètre carré			EMPLOIS REMARQUABLES DE LA PIERRE.			OBSERVATIONS.
	minima.	maxima.	moyenne	Kilg.	Kilg.	Kilg.	
1033 ⁽¹⁾ 1706 ⁽²⁾	4	969 753	1.017 808	994 760	Grand théâtre de Bordeaux; théâtre de Bayonne; église Saint-Pierre, à Orthez; églises de Saint-Palais et de Mauléon; ponts d'Osserain et d'Auteville; châteaux de Mont, de Saint-Etienne et de Sus.		
							M. Larroque exploite une carrière similaire dans la même commune. (1) Quatorzième banc, Lou blanc de 0 ^m 90. (2) Quinzième banc, Lou gris de 0 ^m 70.

Les premières réflexions

Avril 2023

Définition théorique de la géométrie de la voûte



- le joint de rupture des oculés en arc de cercle correspond aux naissances A'B
- les épaisseurs à la clé résultent de la formule $e = 0,15 + 0,15 \sqrt{2R}$ (1).
- L'épaisseur de la voûte mesurée sur le joint qui correspond aux naissances est égale à $e_{AB} = \frac{f}{2R}$

Surbaissement	1/4	1/6	1/8	1/10	1/12
R	1,80	1,40	1,25	1,15	1,10

Données $C = 14,10$, $f = 1,67$
Surbaissement $s = f/C = 1/m = 0,12 \rightarrow m = 8,33$

Rayon théorique

$$R = C \left(\frac{m^2+4}{8m} \right) \quad \text{avec } C = 14,10 \quad m = 8,33$$

$\Rightarrow R = 15,52 \text{ m}$ (mesuré à 15,61 m ouvrage)

Épaisseurs Voûte

$$e_1 = 0,15 + 0,15 \sqrt{2R} \quad \text{avec } R = 15,52 \text{ m}$$
$$e_1 = 0,98 \text{ m (à la clé)}$$
$$e_2 = K e \quad \text{avec } K = 1,25 \text{ pour } s = 0,12$$
$$e_2 = 1,22 \text{ m.}$$

Epaisseur à la clé : 0,98 m

Epaisseur aux reins : 1,22 m

Ces données théoriques permettaient une première approche de la sécurité de la voûte pour :

- . Définir la sécurité de chargements BBLOCS dans un délai très contraint
- . Pour préciser très rapidement le contenu d'une consultation d'entreprise à mener par le CD 64 selon le code de la commande publique et les délais associés.

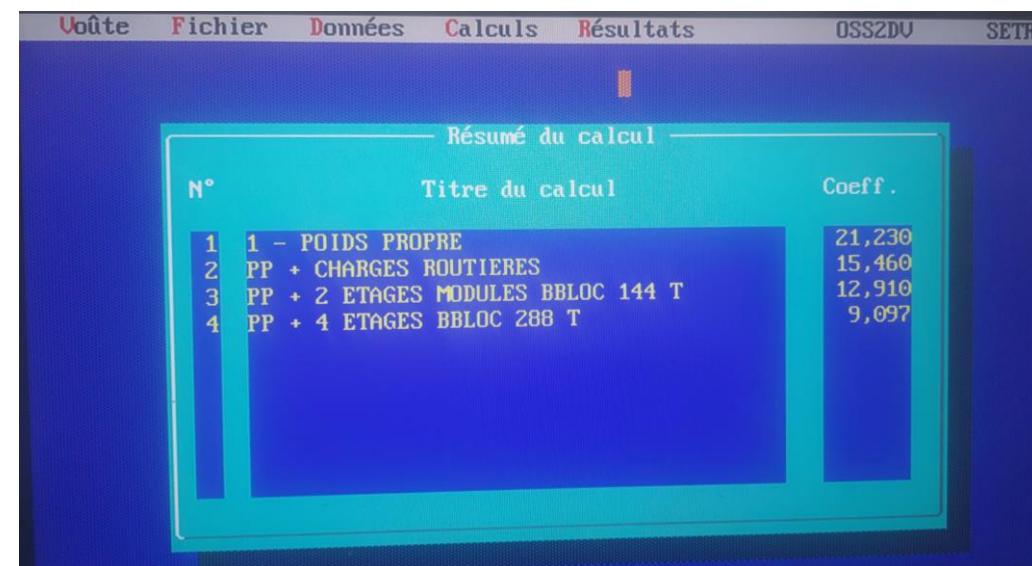
Les premières réflexions

Avril 2023

Les premiers résultats

- Différents niveaux de chargements de BBLOCS sont effectués, et indiquent que la voûte est encore stable et en sécurité après 4 niveaux de chargement !
- On constate alors qu'il sera difficile d'atteindre les limites de stabilité de la voûte.

OPRE2-V1	Géométrie 2 avec remblai	Charge T	Coef. Secu.
	Voûte épaisseur variable 0,69 à 1,38	Poids propre	21,74
	Largeur 6,44, ouverture 14,10	PP + 2 camions Bc	60 15,72
	Fleche 1,83	PP + Chargement 2 niveaux	144 13,09
	Rc 17MPa	PP + Chargement 4 niveaux	288 9,19



Il faut taper très fort sur cette voûte pour la faire réagir, comment ?

Les premières réflexions

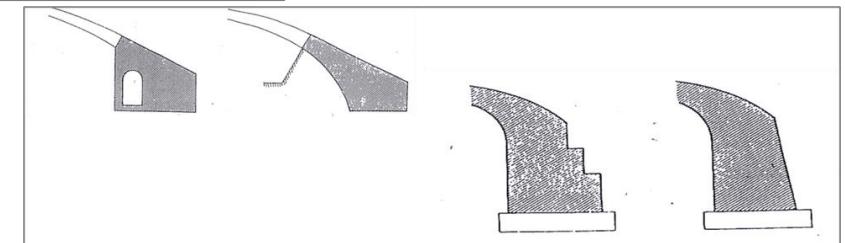
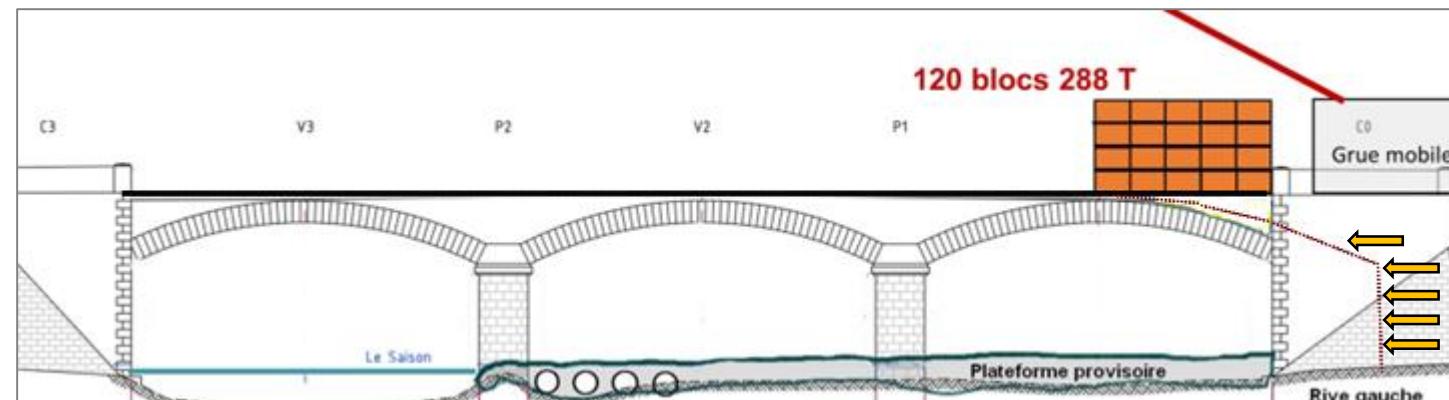
Avril 2023

Les premiers résultats

- Mais d'autres questions et inquiétudes apparaissent rapidement
 - . Le comportement de la culée
 - . Le comportement de la pile

La culée

- Dans l'attente des sondages, elle a été estimée selon les prédimensionnements classiques, et devait supporter les charges de 288 T. Par expérience peu de craintes sur le sujet, car par expérience les réactions horizontales sont butées par un terrain compacté et en place depuis 150 ans... et en bon état selon de précédents sondages.



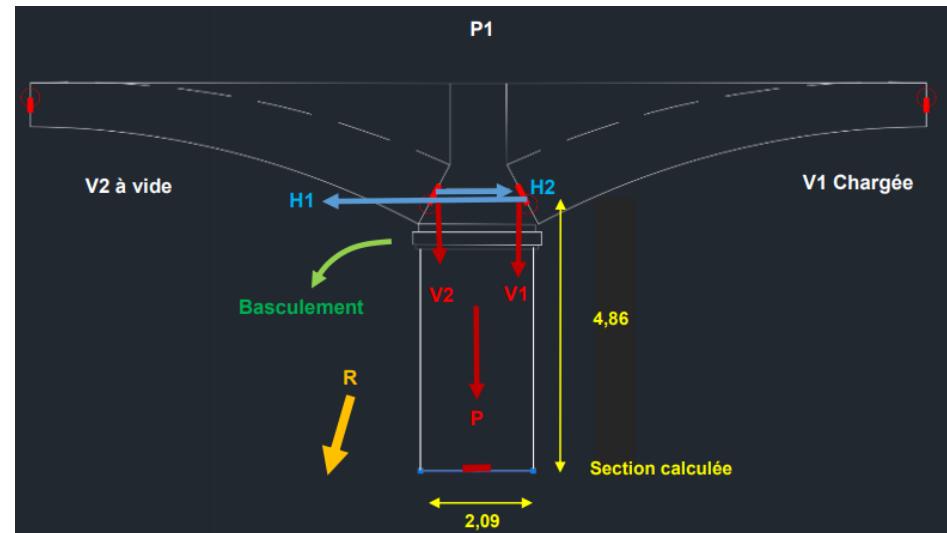
Gérard Viossanges - g.viossanges@gmail.com

Les premières réflexions

Avril 2023

La pile

- Plus inquiétant, les torseurs issus de V1 chargée et de V2 vide, appliqués en tête de pile P1 selon un schéma classique indiquait un effondrement de la pile dès le deuxième niveau. Inquiétudes sur la capacité à réaliser le chargement de 2 et 4 niveaux



Décision est prise de maintenir les chargements sur 4 niveaux en attendant les résultats des benchmarks des autres calculs à venir (éléments finis, discrets...) plus élaborés

Il sera toujours temps d'adapter le programme de chargement en phase opérationnelle.

Le délai contraint

Avril 2023

Programme de recherche DOLMEN	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPT	OCT
Pont d'OSERAIN - Chargement									
Opportunité avec le CD 64									
Premiers calculs sur les chargements possibles									
Mise en place des contributeurs et FA									
Définition des protocoles instrumentation									
Convention DOLMEN/CD 64 MOE assistance									
Investigations sur ouvrage									
Sondages à la pelle									
IDP									
Géotechnique, Carottages, essais compression labo									
Maquette numérique									
Géométrie définitive									
Définition définitive du chargement pour DCE									
Benchmark calculs et instrumentations divers									
Consultation des entreprises									
Pose Instrumentations pile et voûtes									
Essais de chargement sur plusieurs phases									
Déchargement et déconstruction									
Echantillons - Synthèses et Rapports									

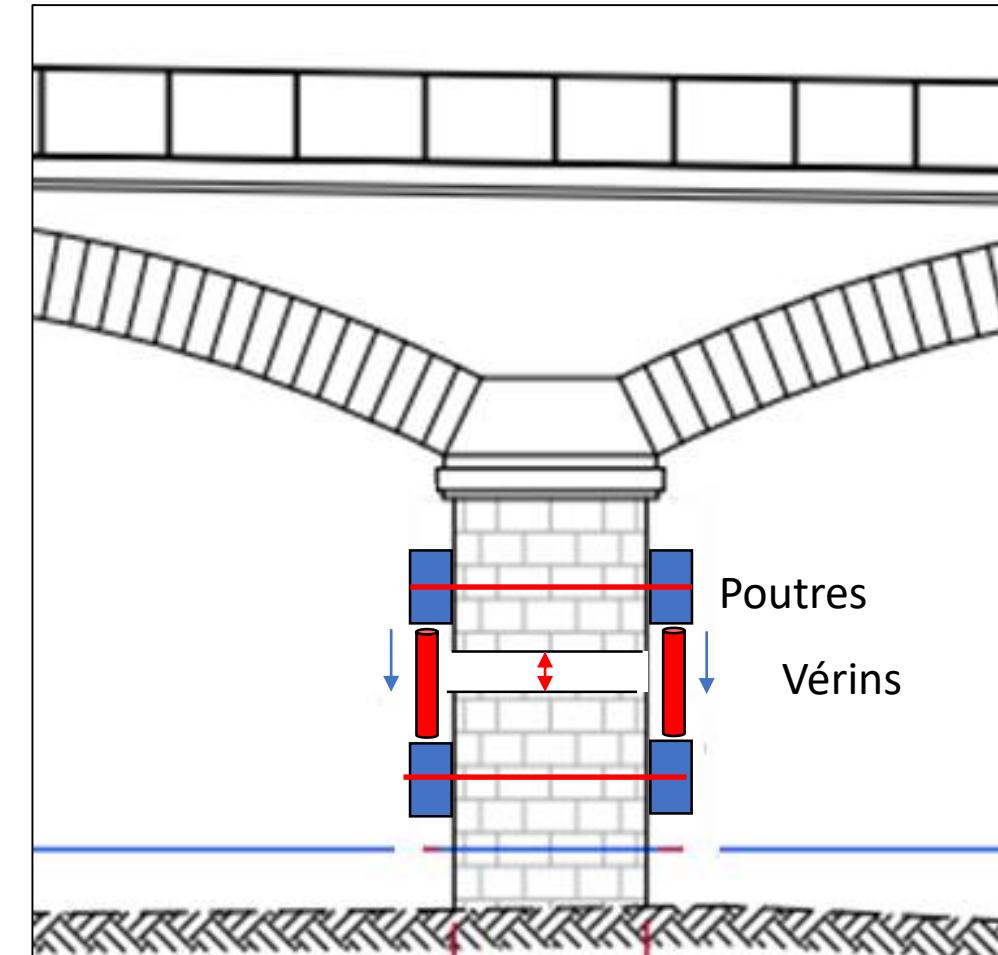
Crues du Saison



Le délai contraint

Avril 2023

- Une tentative de prolonger d'un an la déconstruction aurait permis d'envisager une opération exceptionnelle de dénivellation d'appui.
- Réalisation de poutres
Précontraintes enserrant la pile
- Pose de vérins
- Sciage de la pile
- Vérins pour simuler une dénivellation (tassement)
- Analyses du comportement de la voûte



Proposition VSL

Gérard Viossanges - g.viossanges@gmail.com

Les partenaires figés

Contributeurs



Mai 2023

Coordination Instrumentation : pilotage CEREMA - D LUNAIN

Coordinations calculs et Benchmark : Mimetech - PAUL TAFFOREL

Maître d'ouvrage : CD 64

Maître d'œuvre : CD 64 F LAGFOND D DUCASSE assisté de CONSEILSOA - G VIOSSANGES

Un protocole d'intervention est signé entre DOLMEN et le Département, fixant la liste des intervenants, les protocoles techniques et de sécurité, et la répartition des rôles.

Les contributions financières au programme de recherche sont fixées dans les fiches d'action.

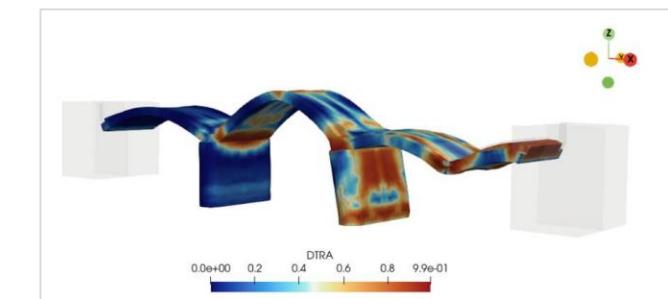
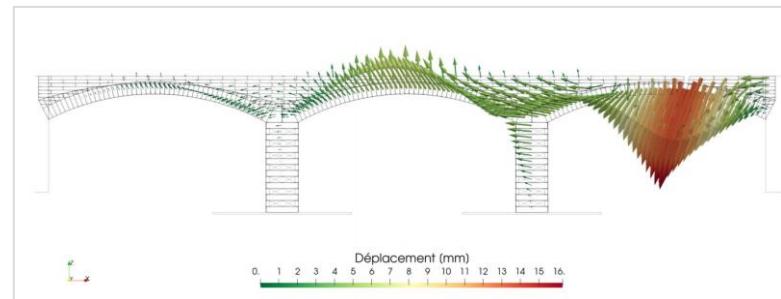
Les enseignements des investigations et benchmarkJuin-juillet 2023

- La géométrie initiale est précisée par les sondages et les relevés intégrant la maquette numérique pour les dimensions extérieures. Les différents calculs sont affinés pour quelques ajustements qui ne modifient pas le programme de chargement.
- La culée s'avère très différente avec une épaisseur de seulement 2,30 ! Etonnant, mais compte tenu des butées attendues des remblais contigus, le programme de chargement n'est pas modifié.
- Les paramètres sur les matériaux sont précisés et validés entre les partenaires (densité, module théorique...) pour établir un « benchmark » sur les mêmes bases.
- Des difficultés sont apparues dans l'exploitation des carottages des maçonnerie qui n'ont pu aboutir aux objectifs fixés par le programme.

Les enseignements des différents calculs

Juillet 2023

- Tous les modèles de calcul, simples ou complexes, confirment la stabilité de la voûte.... sous 4 niveaux 288 T de chargement.
- Mais les modèles de calcul numériques complexes semblent converger sur une pile P1 qui se déforme, mais resterait encore stable sous le chargement de 288 T. Cela bouge mais cela ne rompt pas....?



- Information qui « rassure » le pilotage de la mise en œuvre du chargement: mais grande prudence dans la sécurité des étapes de chargement avec:
 - . Le souhait d'analyser in situ, à chaque étape du chargement, les informations exploitabless issues de l'instrumentation.
 - . Garder la maîtrise de poursuivre ou non le chargement en fonction de ces informations et des observations in situ
 - . Mettre en œuvre des procédures de chantier préservant la sécurité du personnel en cas d'effondrement imprévu (intégrées au CCTP de la consultation, et vérifiées in situ).

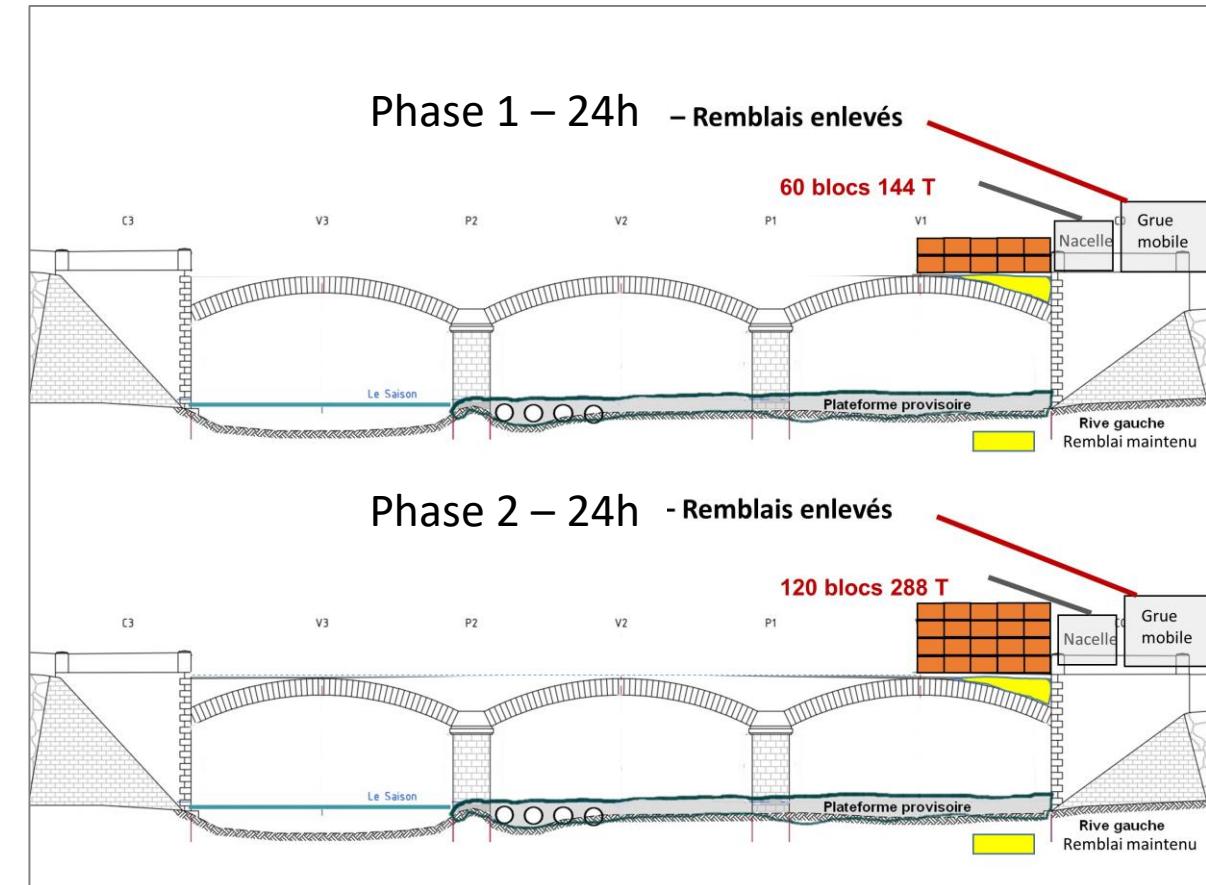
Les calculs prévisionnels définitifs....

Juillet – Septembre 2023

- Devant la résistance attendue de la voûte, décision est prise de la fragiliser en réalisant une saignée de 25 cm de son épaisseur. L'ensemble des différents calculs prévisionnels sont repris dans ce sens.

Chargements définitifs

- Volonté de laisser chaque phase de chargement pendant 12 à 24 h pour permettre à la maçonnerie de s'adapter



Une préparation minutée et organisée

Octobre 2023

La mise en œuvre de l'instrumentation

- Planning organisé sur 2 semaines du 9 au 21 octobre – co activité, partage des moyens d'accès.... Une gestion rigoureuse et complexe dans des délais très contraints.

Enlèvement des remblais 18 au 24 octobre



Réalisation de la saignée

24 octobre 2023

Octobre 2023

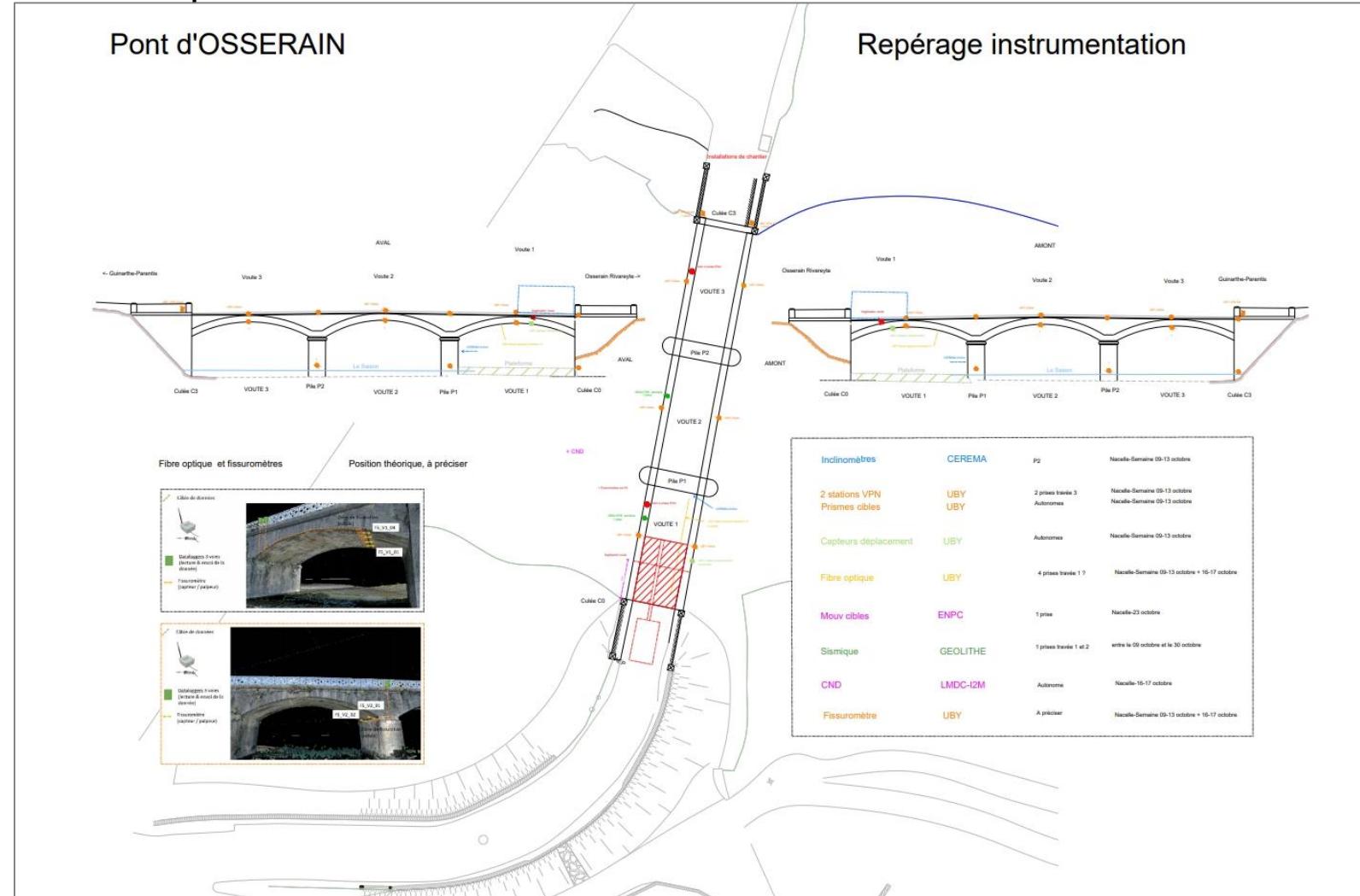
- Difficile,... Pierre dure



Check list instrumentation 24 octobre 2023

Octobre 2023

- Tous les systèmes sont opérationnels



Phase de chargement 1 - 24 octobre 15h-18h30

Octobre 2023

- Chargement de 60 BBLOCS 144 T
- Chronométrage, et pesage de chaque blocs
- Point d'arrêt pour évaluations des résultats d'instrumentation **RIEN NE BOUGE le soir selon bilan à 21h30**



Phase de chargement 1 - 25 octobre

Octobre 2023

- Point d'arrêt le 25 octobre à après une nuit de chargement - **RIEN N'A BOUGE**
- Observation des rotules sur site : rien de visible



- On observe un suintement de l'humidité en intrados de voûte, preuve que le chargement « comprime » le remblai en chassant l'eau

On continue..le programme

Phase de chargement 2 25 octobre 8h40-16h

Octobre 2023

- Poursuite de la pose de 120 BBLOCS pour atteindre 288 T, objectif du programme

- **Point d'arrêt à 16h** : mouvements peu détectables ou exploitables, en clair

RIEN NE BOUGE! Déception, car si pas de mouvements, pas de possibilité de post traitements des calculs complexes par les partenaires des benchmark de calculs!

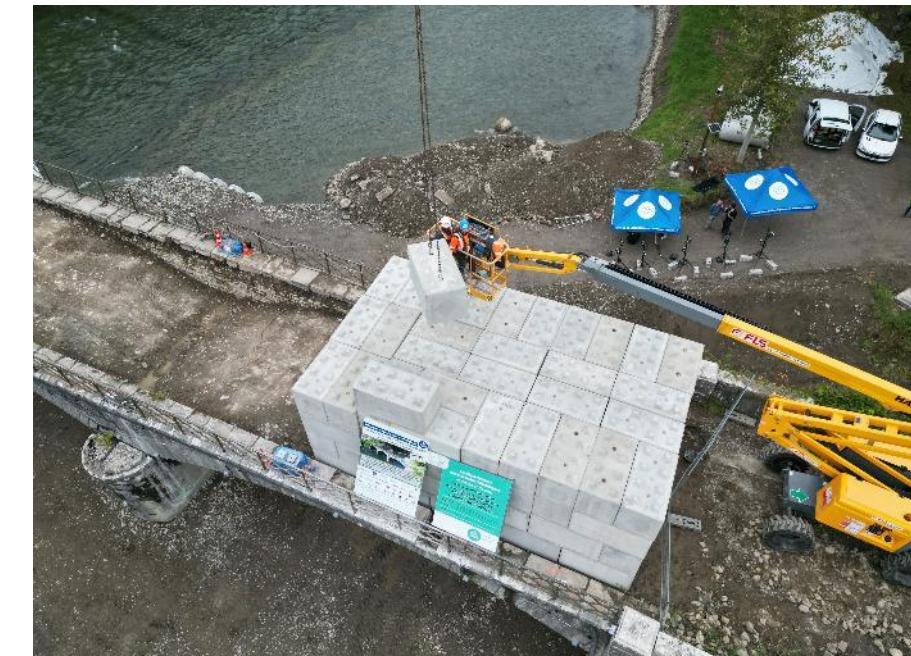


Phase de chargement 2 25 octobre 8h40-16h

Octobre 2023

- **Discussions d'urgence in situ avec la maîtrise d'œuvre du CD 64:**
 - Des BBLOC apprivoisés en sécurité sont encore disponibles sur site
 - Analyse du risque de rupture au vu du comportement connu de la maçonnerie
 - Analyse sécurité des opérateurs et des risques de perdre des BBLOCS en cas d'effondrement
 - Analyse de l'échec relatif du programme OSSERAIN si rien ne bouge...
- **Décision de poursuivre le chargement pour tenter de solliciter un mouvement de la voûte ou de la pile**

→ **On sort du protocole initial et on décide de continuer le chargement pour tenter de donner aux chercheurs mobilisés des données exploitables**



Phase de chargement 2 bis 25 octobre 16h30 – 17h30

Octobre 2023

- Poursuite de la pose de 30 BBLOCS disponibles de plus pour atteindre 360 T !, répartis au mieux des capacités de la grue sur 5 et 6 niveaux, tout en observant le comportement des rotules de la pile.



Phase de chargement 2 bis 25 octobre 16h30 – 17h30

Octobre 2023

- A la fin de ce chargement ultime, interrogation des résultats des instrumentations le lendemain
- **Bonne nouvelle cela bouge !!!**
- L'ouvrage nous répond enfin, « aïe vous me faites mal »
- Les déplacements observés par l'instrumentation et dans les analyses ultérieures confirment des déplacements centimétriques qui pourront être exploités ultérieurement par les benchmark de calculs, pour recalibrer les modèles complexes et revoir les méthodes de calculs classiques.
- Satisfaction des intervenants d'obtenir un résultat pour le travail à postériori des chercheurs.



Déchargement 26-27 octobre

Octobre 2023

- Enlèvement des chargements sur l'ouvrage : 2 jours de dépose des BBLOCS
- Car la décision de ne pas effondrer l'ouvrage sous chargement (préservation des BBLOCS loués) fait partie des conventions établies avec le département



- Les premières crues se manifestent déjà

La triste fin....

31 octobre

Octobre 2023

7h30-8h30: Inspection de sécurité technique définitive**9h30 – 10h30 Point d'arrêt :** redéfinition orale du protocole entre les opérateurs, gestion des contacts et pilotes de drones avec l'opérateur de la pelle BRH**11 h 30 Début déconstruction :** technique BRH au niveau de la saignée de la voûte**11 h 38 Effondrement de la voûte:****11 h 40 Effondrement des autres voûtes**

Comme prévu par notre étude initiale.... Mais très rapidement



ConclusionsOctobre 2023

- Une dense expérience technique, scientifique et humaine, mais triste pour un bel ouvrage en maçonnerie mais dont la déconstruction a servi à la science. Il a donné son « corps » pour faire progresser la façon de calculer ces ouvrages, et le pari est gagné.
- Fort investissement des partenaires, avec une organisation de type compte à rebours et des rapports de confiances mutuelles avec les intervenants et le MOA, ce qui a permis de réaliser dans les temps le programme avec des prises de risques anticipées et encadrées.
- Avancées sur les modes de calcul, notamment sur la confirmation du comportement des piles par leur capacité à réagir et à s'opposer au basculement de piles pour les ouvrages multiarches.
- Une expérience rare et riche d'enseignements pour le calcul des ouvrages voûtes en maçonnerie
- De nouvelles directives de calcul à venir, en intégrant d'autres expériences en cours sur d'autres ouvrages du programme DOLMEN.

Vidéo de synthèse 3 mn



Développement d'Outils et de Logiciels
pour la Maçonnerie Existante et Neuve

Merci de votre attention

www.pndolmen.fr

Journée AFGC

**22 Janvier 2026 - Conférences INSA TOULOUSE
Restitution du chantier démonstrateur du pont d'OSSERAIN**



Association Française de Génie Civil