

DIRECTION VOIRIE COMMUNAUTAIRE ET ESPACE PUBLIC
Service Gestion du Patrimoine – Unité Ouvrages d'Art
83, rue du Mail - BP 80011 - 49020 ANGERS Cedex 02 • Tél : 02 41 21 54 49 / 27
www.angers.fr • nicolas.lebas@angersloiremetropole.fr

SIXENSE

un TERRITOIRE EN MOUVEMENT

angers loire métropole

Conférences Techniques
TERRITORIALES



L'ouvrage et son évaluation

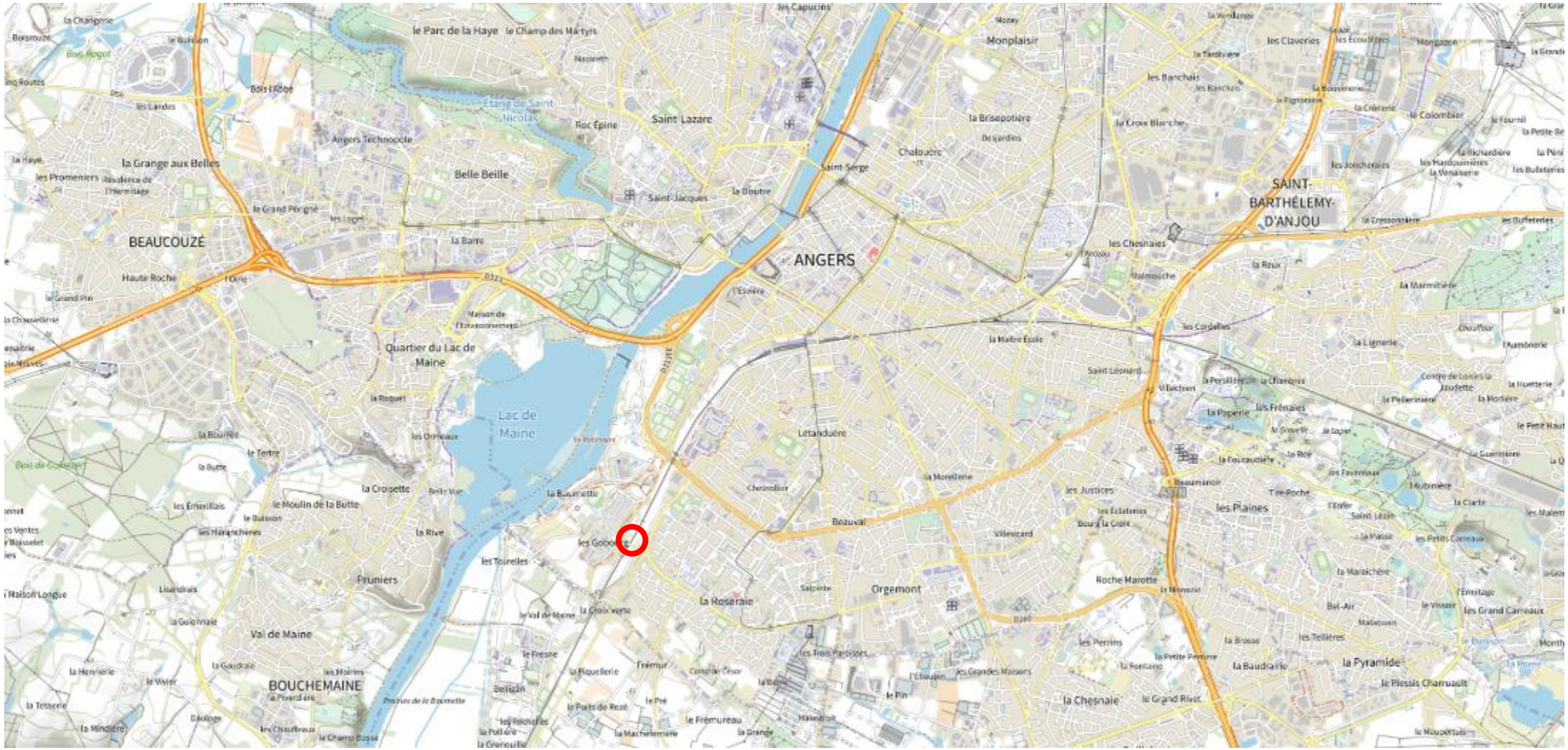
J

DIRECTION VOIRIE COMMUNAUTAIRE ET ESPACE PUBLIC
Service Gestion du Patrimoine – Unité Ouvrages d'Art
83, rue du Mail - BP 80011 - 49020 ANGERS Cedex 02 • Tél : 02 41 21 54 49 / 27
www.angers.fr • nicolas.lebas@angersloiremetropole.fr

un TERRITOIRE EN MOUVEMENT

angers loire métropole

L'ouvrage : localisation

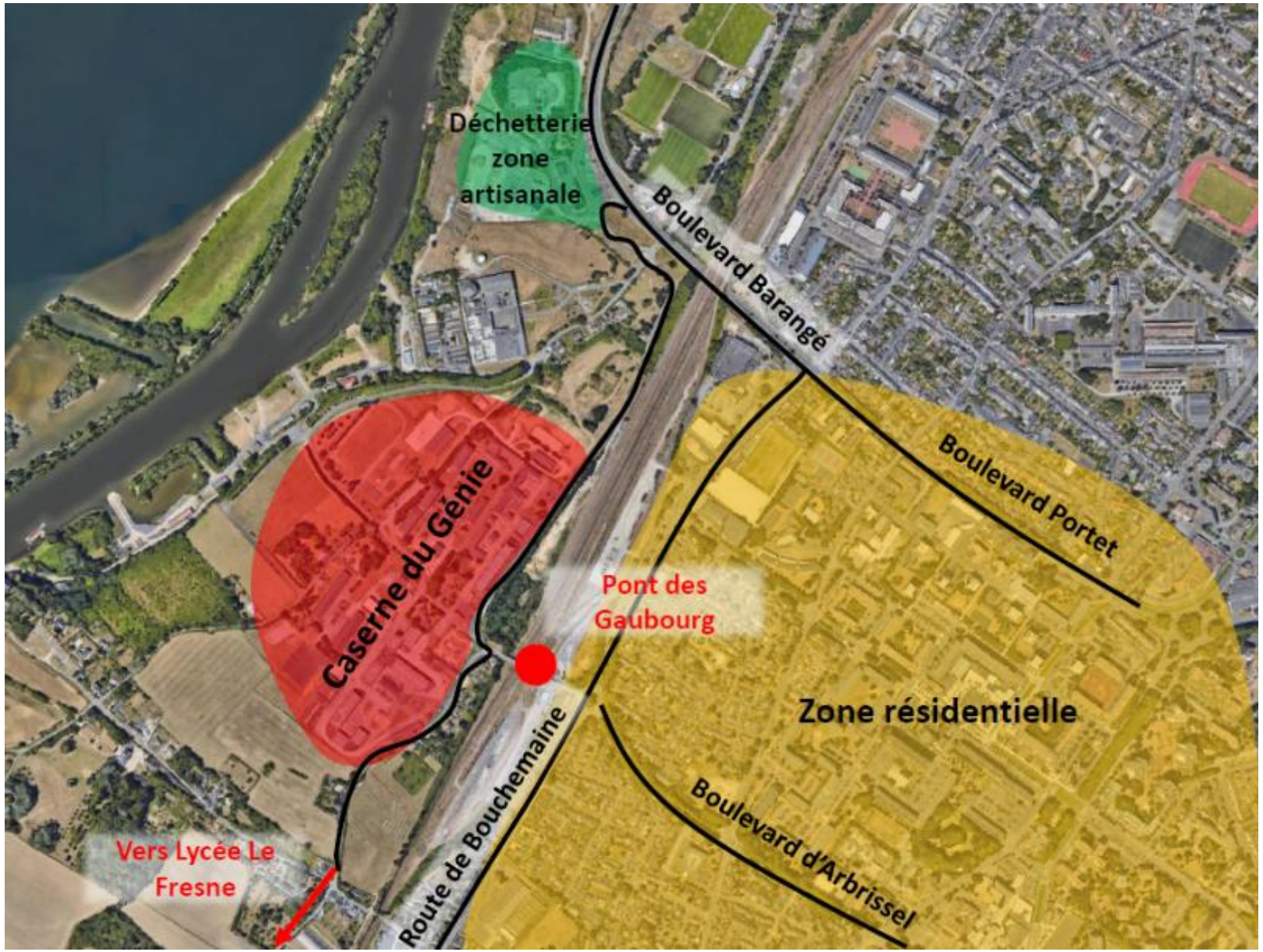


L'ouvrage

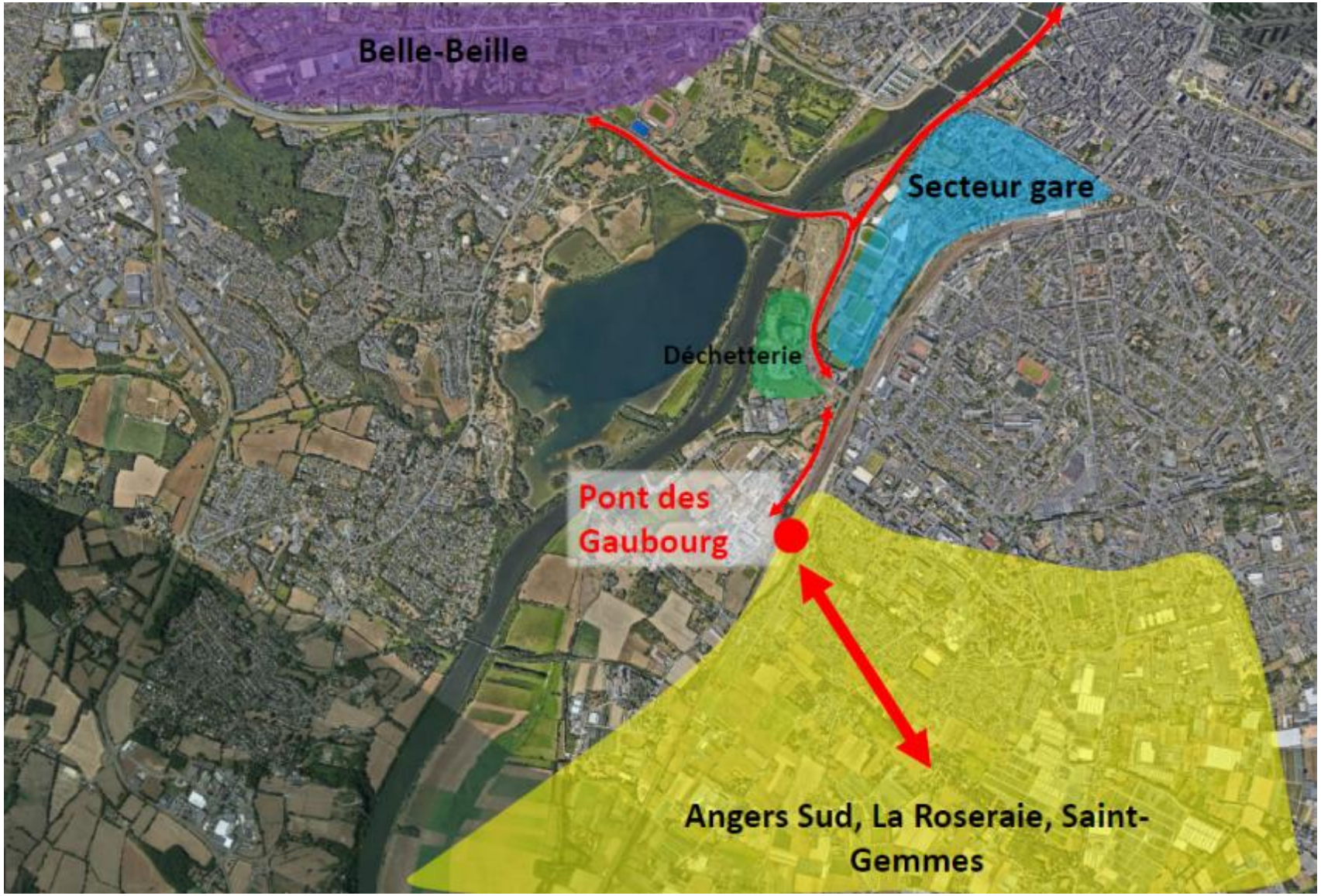




L'ouvrage : les enjeux locaux



L'ouvrage : les enjeux élargis

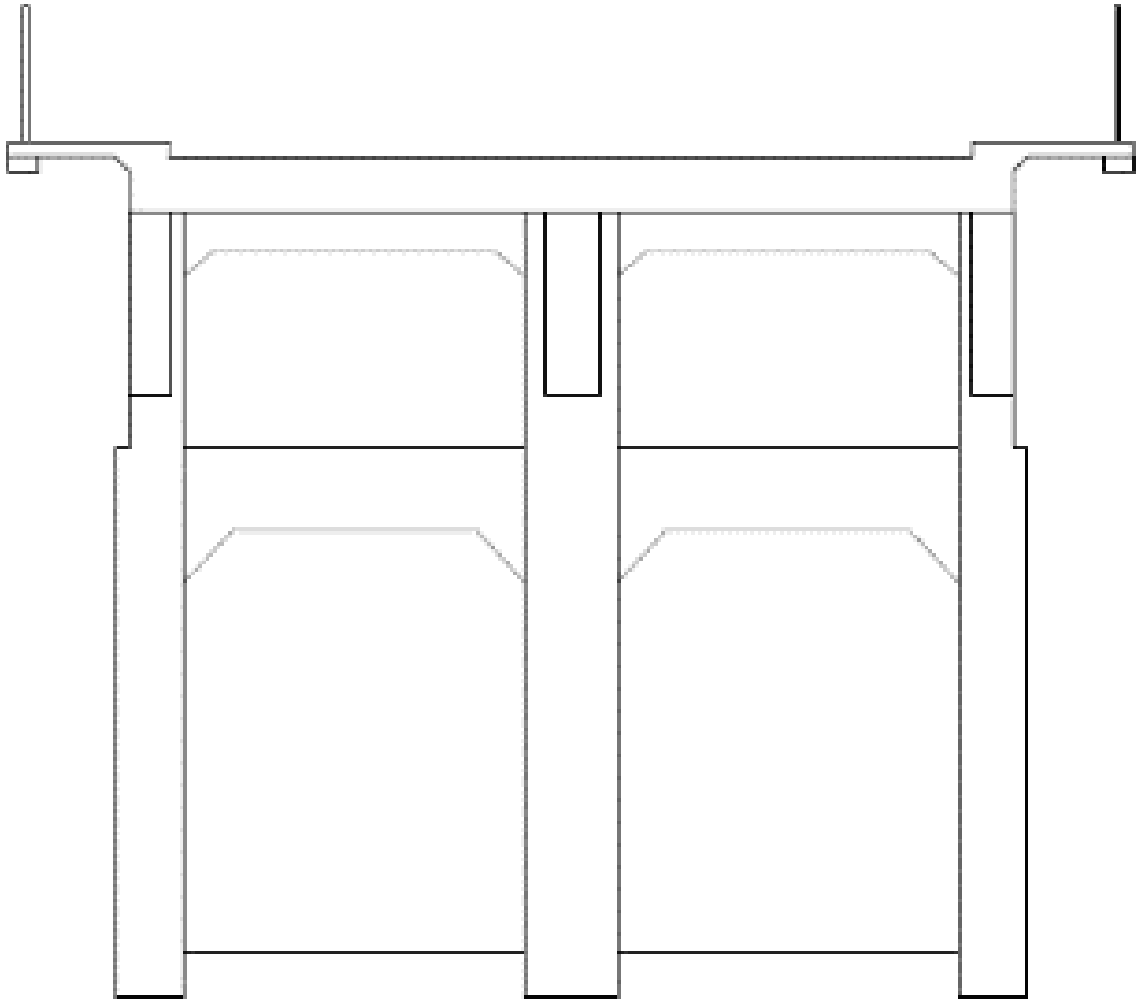


L'ouvrage : les enjeux des circulations douces

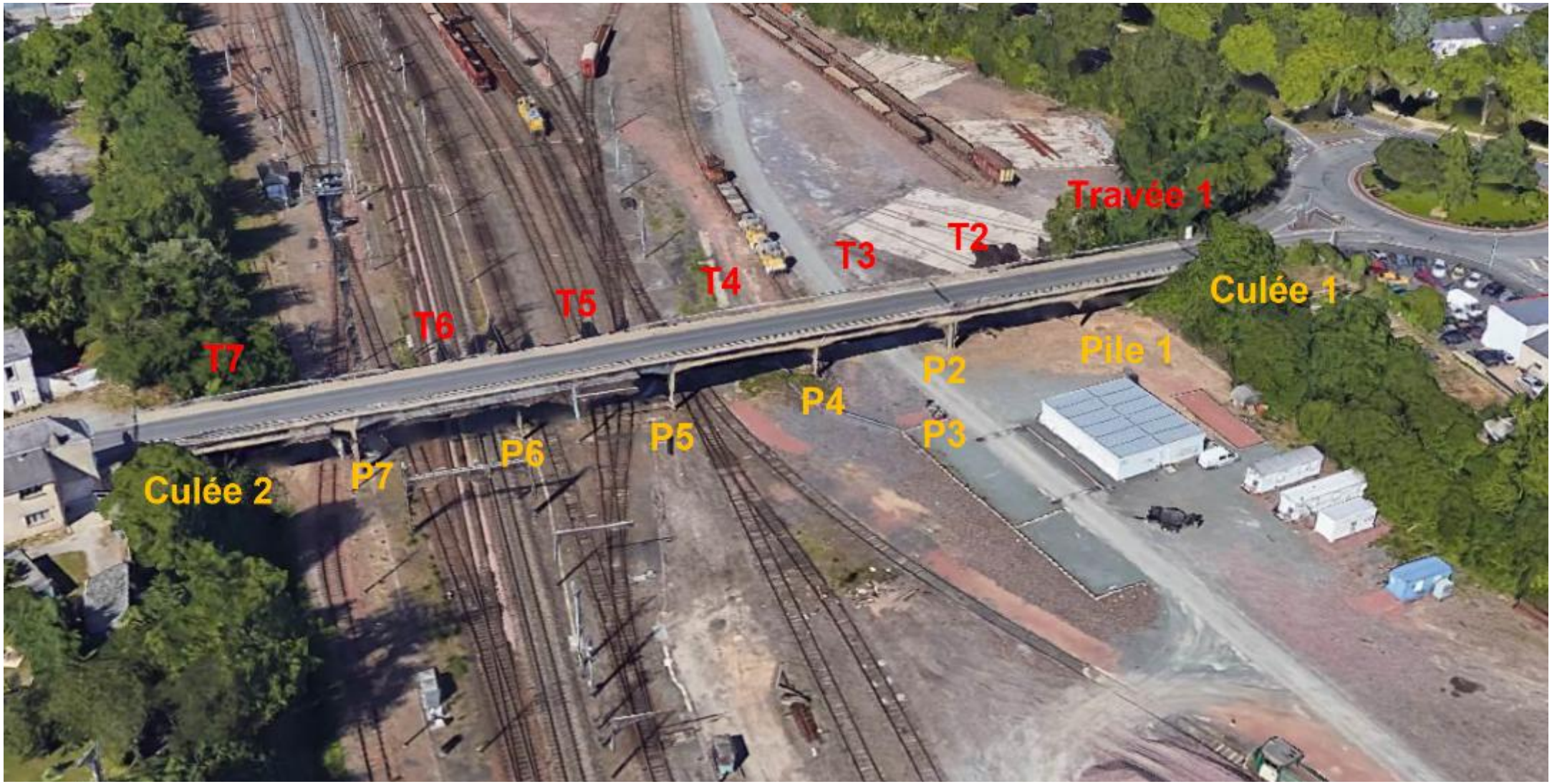


L'ouvrage : structure

Année de construction	1916 - 1921
Type de structure	Pont à poutres sous chaussées en béton armé
Limitation de tonnage	12 T
Largeur 7,80 m	7,80 m
Longueur	140 m 97 m (OA Ouest) 43 m (OA Est)



L'ouvrage : composition



Pathologies



Pathologies



Pathologies



Pathologies



Pathologies



Pathologies



Pathologies



Pathologies



Pathologies



Pathologies

Voie portée	Rue des Champs Saint Martin
PR	NC
Nom réduit	**PF0013**
Nom	Pont des Gaubourgs
Type	Pont à poutres sous chaussée en béton armé

Classe en l'état	**3U**
Visite effectuée par	R.BILLEAUD/L.ANTIER
Visite effectuée le	26/08/2024
Condition météo	Ensoleillé
Température	22C
Moyen d'accès	Nacelle VL + Pédestre

Structure

Tablier	Classe	S
Poutraison sous chaussée	3U	
Défauts du matériau béton de la dalle	3	
Classe tablier	3U	
Appuis indépendants	Classe	S
Piles		
Superstructure des piles	3	
Défauts du matériau béton des piles	2	
Classe piles	3	
Culées	Classe	S
Superstructure des culées	2	
Défauts d'aspect des culées et des murs	2	
Classe culées	2	

Equipements

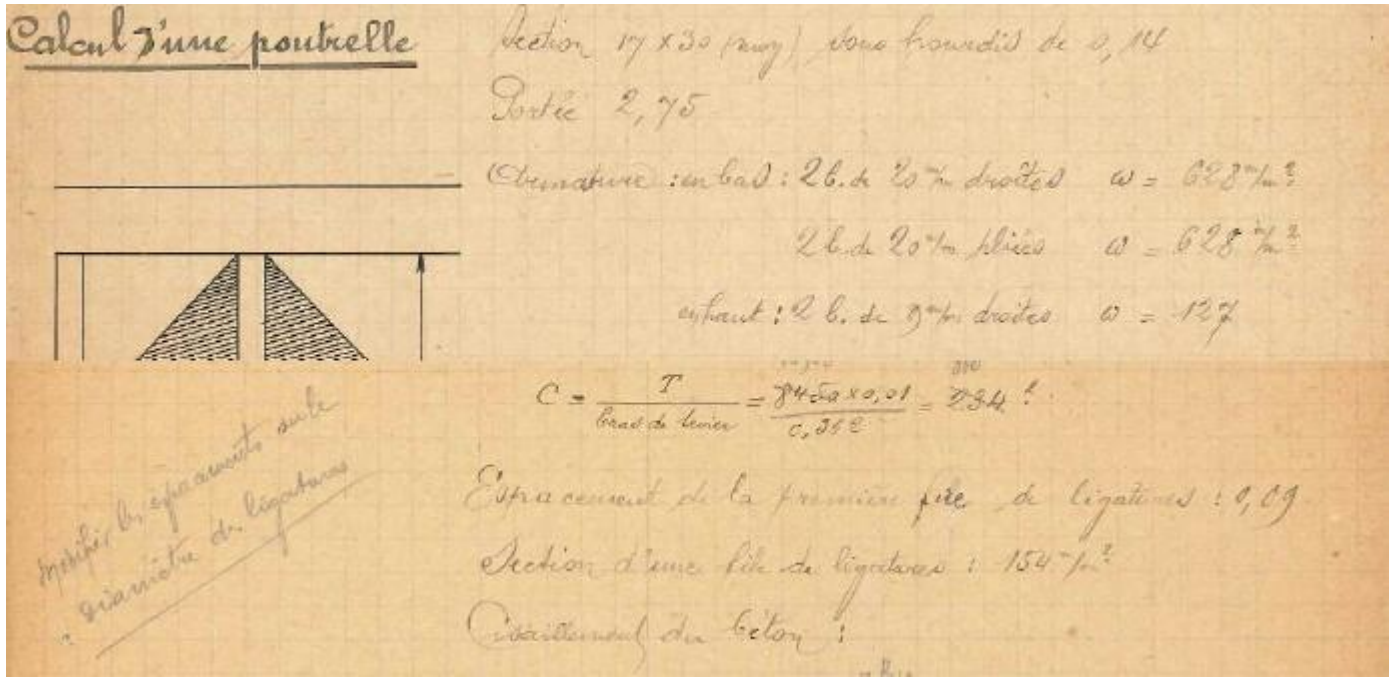
Équipements sur ouvrage	Classe	S
Chaussée	2E	
Trottoirs et bordures	2	
Dispositifs de retenue	2	
Corniches	2	
Joints de chaussée et de trottoir	2	
Classe équipement sur ouvrage	2E	
Équipements sous ouvrage	Classe	
Chaussée de la voie franchie	NC	
Dispositifs de retenue	NC	
Classe équipement sous ouvrage	NC	
SYNTHESE POUR L'OUVRAGE	Classe	S
Equipements	2E	
Tablier	3U	
Appuis indépendants	3	
CLASSE DE L'OUVRAGE	**3U**	

Pathologies : conclusion

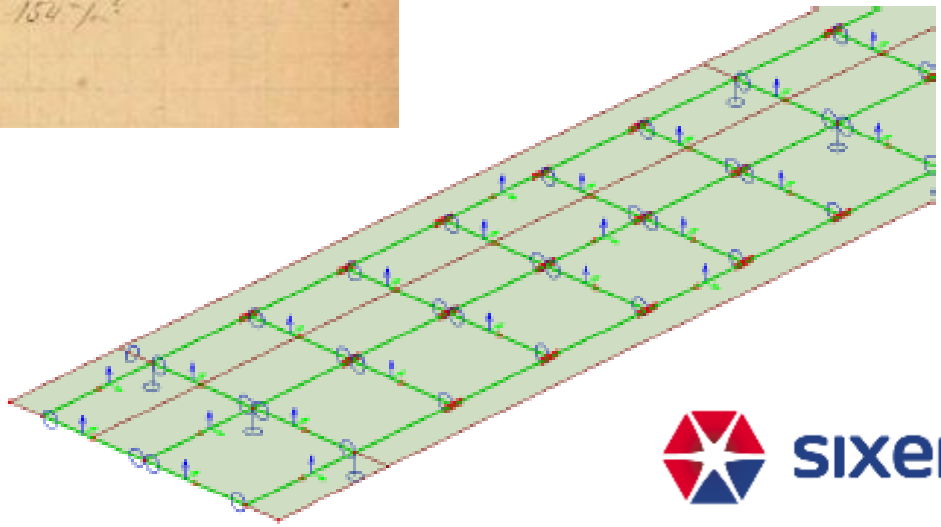
Ouvrage présentant des pathologies légitimes mais impactant sa capacité portante

Besoin de recalcul pour déterminer à court terme les modalités d'exploitation

Etude structurelle



Pas de justification de l'ouvrage
pour des véhicules > 12 tonnes
(incertitudes sur l'intégrité des entretoises non levées après investigations complémentaires)



Conclusion sur l'ouvrage existant

- L'ouvrage a dépassé la durée de service (pour laquelle il aurait été conçu aujourd'hui)
- Sa structure est dégradée et sa réparabilité en question (réparation onéreuse et peu pérenne)
- L'ouvrage est très utile et accueille un trafic important et d'un tonnage supérieur à celui pour lequel il peut être justifié

- Le remplacement de l'ouvrage (ou son changement de destination) semble inéluctable

- Le renouvellement de l'ouvrage doit être anticipé (7-8 ans) du fait de sa localisation, du coût de l'opération

⇒ Mise sous surveillance renforcée de l'ouvrage dans l'attente de concevoir et réaliser le nouveau franchissement

⇒Recherche de performance (efficacité, pertinence et efficience) pour une instrumentation sur un temps long

Conférences Techniques
TERRITORIALES



Surveillance renforcée

J

DIRECTION VOIRIE COMMUNAUTAIRE ET ESPACE PUBLIC
Service Gestion du Patrimoine – Unité Ouvrages d'Art
83, rue du Mail - BP 80011 - 49020 ANGERS Cedex 02 • Tél : 02 41 21 54 49 / 27
www.angers.fr • nicolas.lebas@angersloiremetropole.fr

SIXENSE

un TERRITOIRE EN MOUVEMENT

angers loire métropole

Situation de l'exemple risques / usages (guide IMGC)

Risque
Mauvaise conception et mauvaise exécution
Vieillissement des matériaux
Changement d'usage ou de conditions d'exploitation ?
Événements exceptionnels ?
Interaction sol/structure
Interaction structure / structure
Modification de l'environnement et travaux à proximité de l'ouvrage

Usage
Diagnostic
Surveillance préventive
Surveillance renforcée
Haute surveillance
Surveillance dans le cadre de travaux sur les avoisinants

Historique

2018 : Diagnostic structurel (GINGER CEBTP)
2020 : Visite d'évaluation (SIXENSE)
2021 : Recalcul de l'ouvrage (SIXENSE)
2024 : IDP (hors voies ferroviaires circulées) (SIXENSE)
2023 : Etude d'opportunité d'un nouveau franchissement (ALM)
2024 : Etude de faisabilité d'un nouveau franchissement (SCE)
2024 : Etude de définition de l'instrumentation (SIXENSE)
2024 : Diagnostic complémentaire (SIXENSE)
2025 : Instrumentation d'une travée (SIXENSE)
2026 : IDP(voies ferroviaires circulées) (SIXENSE)

Le contexte de la surveillance :

- ouvrage vieillissant
- risque relatif à la sécurité structurale mais pas de pathologie unique, ponctuelle bien identifiée à surveiller :
  → nécessité d'un dispositif d'instrumentation général optimisé capable de détecter une dégradation du comportement structurel de l'ouvrage sans localisation *a priori*

Comment définir l'instrumentation ?

→ quels capteurs choisir ?
→ mettre plusieurs capteurs par travée ? dans chaque travée ? dans une travée sur 2 ? sur toutes les poutres ?
→ comment traiter les données ?

Et la question centrale sous-jacente :

→ Comment évaluer la performance d'un dispositif de surveillance ?

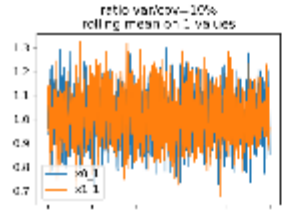
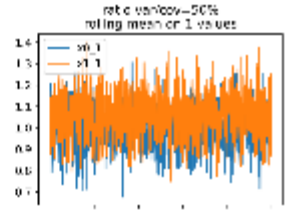
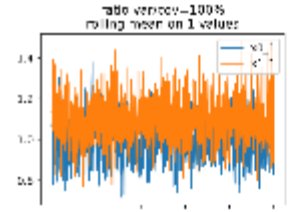
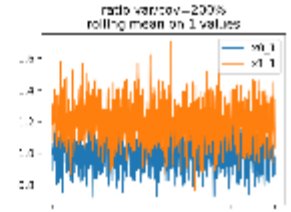
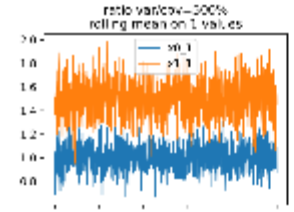
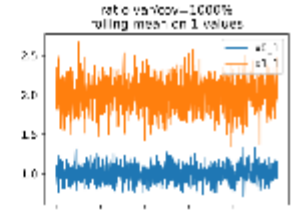
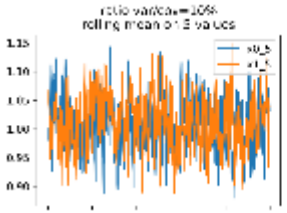
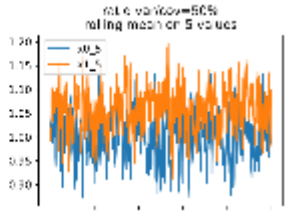
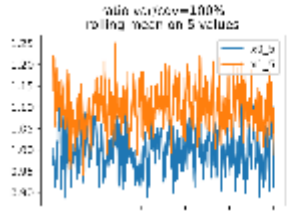
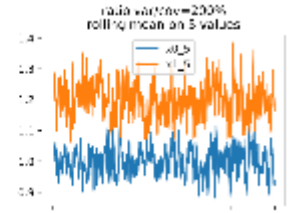
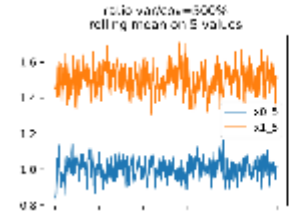
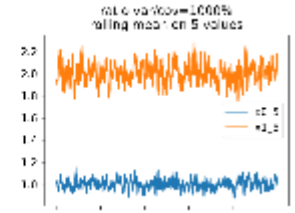
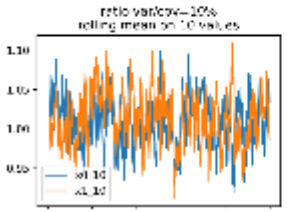
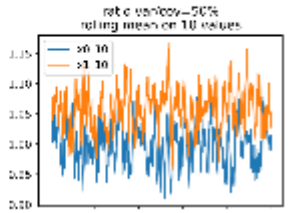
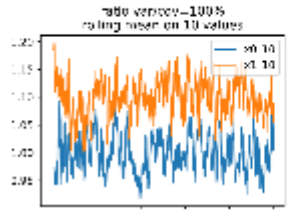
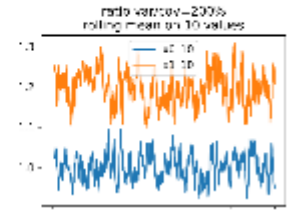
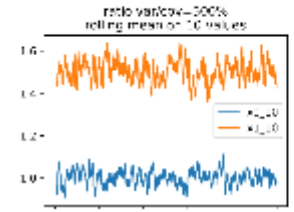
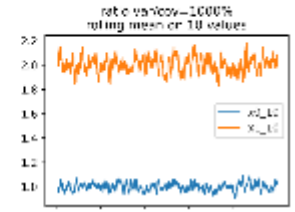
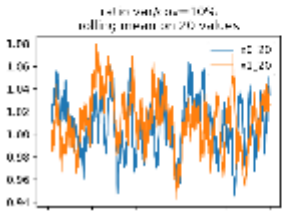
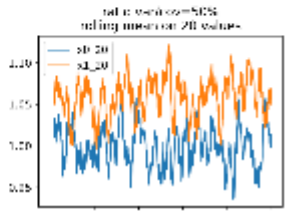
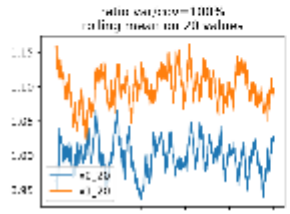
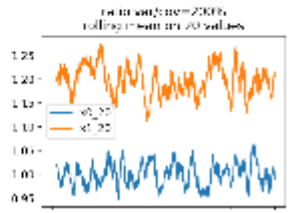
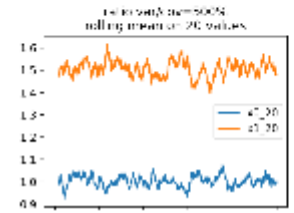
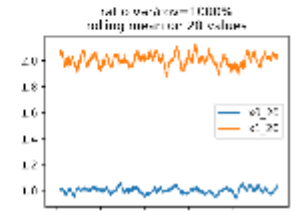
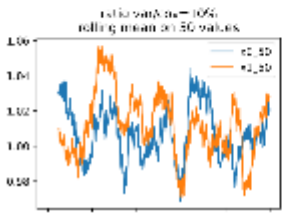
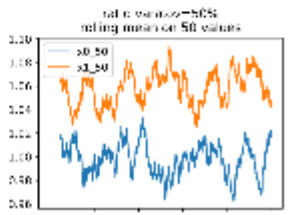
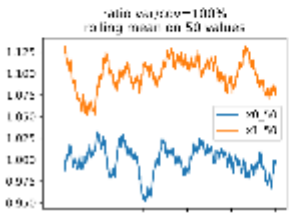
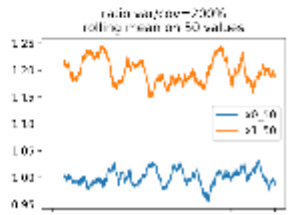
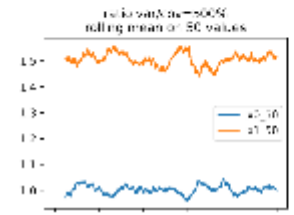
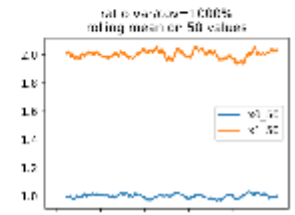
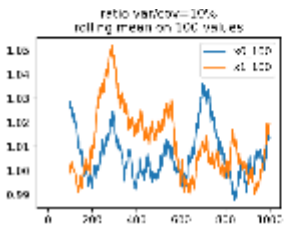
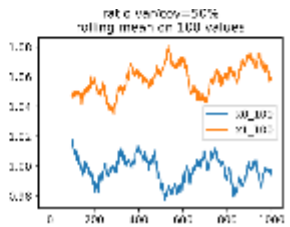
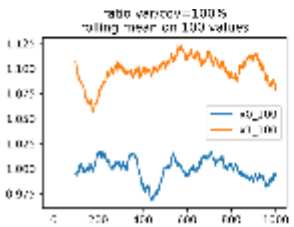
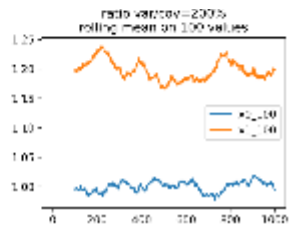
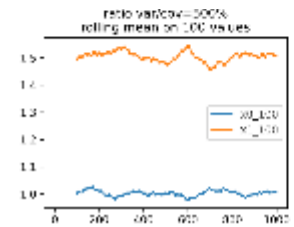
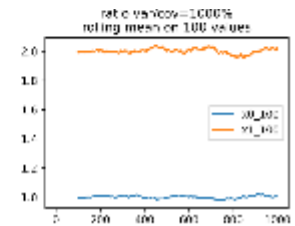
Evaluation de la performance d'un dispositif de surveillance :

- la performance s'évalue à l'aune de l'objectif à remplir
- l'objectif de l'instrumentation est double :
  - sensibilité à un éventuel endommagement
  - insensibilité au reste : indicateur non biaisé
- la sensibilité peut se mesurer à la variation de l'indicateur pour un scenario d'endommagement donné : var
- l'absence de biais se mesure à la dispersion de l'indicateur en l'absence d'endommagement : cov
- var et cov peuvent être estimés via une modélisation numérique *ad hoc*, couplée à un générateur de signaux temporels théoriques bruités
- bonne performance = var maximal et cov minimal = var/cov maximal

→ retenir VCR (Var Cov Ratio = var/cov) comme indicateur de la performance dispositif

- question suivante : comment définir l'objectif de performance (VCR_{mini}) à atteindre ?

→ en prescrivant un délai de détection maximal pour un scenario d'endommagement donné

VCR : (var/cov)	10%	50%	100%	200%	500%	1000%
moyenne glissante sur N valeurs N= 1						
5						
10						
20						
50						
100						

Objectif de performance selon le délai de détection requis

$$VCR_{\text{mini}} = \frac{\Phi^{-1}(p)}{(\beta - 1) \cdot \sqrt{d \cdot f_c}}$$

en pratique :
pour un trafic de 100 véhicules/jour, si le délai de détection requis vaut 12h → VCR_{mini} = 50%

Application au pont des Gaubourgs

- objectif : concevoir un dispositif de surveillance automatisé, permanent, global, à long terme

d'où la méthodologie retenue :

→ surveiller la réponse de l'ouvrage sous trafic ambiant

→ extraire en temps réel de cette réponse un indicateur objectif (VCR maximal) de son état structurel

- biais principaux de la réponse d'un pont routier sous trafic ambiant :
  1. variabilité des charges dues aux véhicules : poids, vitesse, répartition du poids entre essieux, distance entre essieux, position transversale
  2. température (variation temporelle et gradient)
  3. vent/neige

- choix retenu : surveillance renforcée par acquisition dynamique sous trafic ambiant et analyse des lignes d'influence (extraction de grandeurs d'intérêt (métriques) : max, min, intégrale, etc.)

- intérêt majeur : s'affranchir des biais 2 et 3 (effets thermique/climatique) et de dérive long terme car l'analyse porte sur des délais courts (quelques secondes)

- leviers possibles pour maximiser le VCR (minimiser le biais 1 et maximiser la sensibilité var) :
  - choix types/localisation/nombre de capteurs
  - traitement des données : lissage, fenêtrage, choix et combinaison des métriques, etc.

Application au pont des Gaubourgs : démarche suivie

- instrumentation test sur une travée pendant 3 mois pour obtenir les réponses réelles pour un jeu de capteurs





Application au pont des Gaubourgs : démarche suivie

- étude de sensibilité fondée sur un jeu d'outils développés en interne sous python :

beampy

Modélisation EF → **Calcul des lignes d'influence**

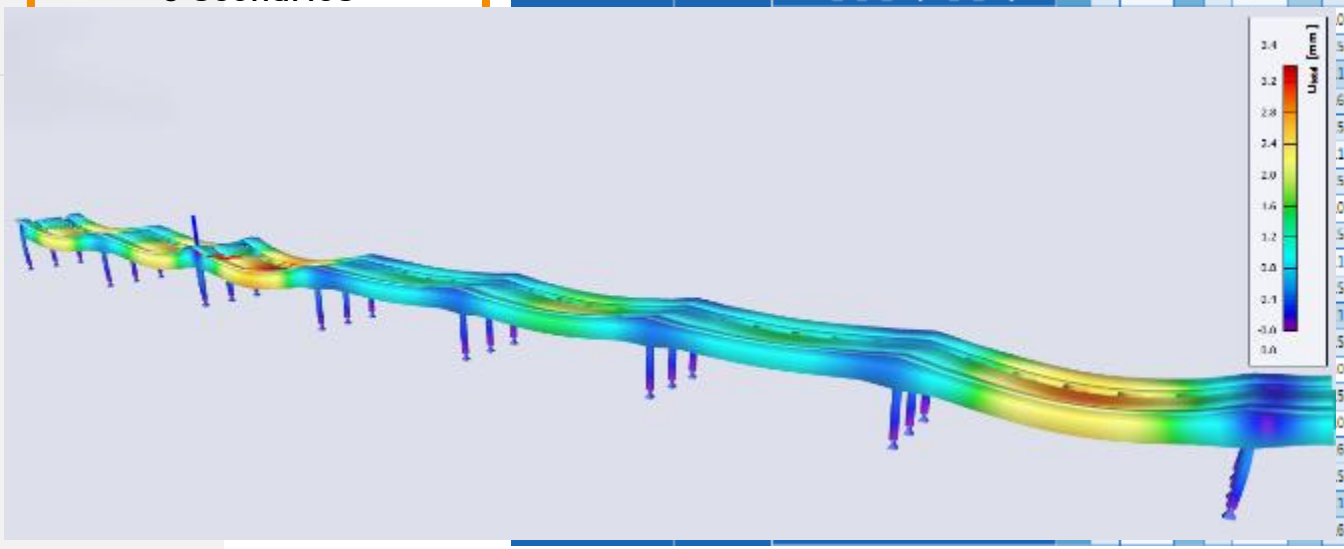
SHMpy

Génération des signaux temporels bruités → **Extraction métriques** (pour chaque ligne d'influence) → **Traitement statistique** (obtenir VCR pour chaque métrique/scenario endommagement)

calibration du modèle pour cohérence signaux réels/théoriques

Positions des capteurs
100 véhicules réels
7 positions transversales
8 scenarios

Caractéristiques des capteurs



damaged_section_name	damage_level	sensor_name	cov	var	var/cov	cov	var	var/cov	cov	var	var/cov	cov	var	var/cov	cov	var	var/cov	cov	var	var/cov	cov	var	var/cov	cov	var	var/cov
		ext_T2_P1_noisy/ext_T2_P2_noisy	77.5	0.1	0.0	48.1	0.1	0.0	39.7	0.5	0.0	48.8	0.5	0.0	34.1	0.0	0.0	45.7	0.5	0.0	2.3	0.4	0.2	116.6	1.0	0.0
		ext_T2_P1_noisy/ext_T2_P3_noisy	121.0	0.1	0.0	91.2	0.1	0.0	74.9	1.1	0.0	92.5	0.9	0.0	56.6	0.0	0.0	100.3	1.0	0.0	3.3	0.8	0.2	4312.7	1.5	0.0
		ext_T2_P1_noisy/ext_T2_noisy	67.9	0.1	0.0	47.1	0.1	0.0	39.4	0.6	0.0	47.8	0.4	0.0	29.4	0.0	0.0	39.6	0.5	0.0	3.2	0.3	0.1	-97.2	1.0	0.0
			0.0	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	3.9	0.0	0.0	28.2	0.0	0.0	6.3	0.0	0.0	304.1	0.4	0.0						
			5	0.0	0.0	49.0	0.5	0.0	34.3	0.0	0.0	46.0	0.5	0.0	5.4	0.4	0.1	116.5	1.0	0.0						
			1	0.0	0.0	92.7	0.9	0.0	59.6	0.0	0.0	101.8	1.0	0.0	7.8	0.8	0.1	1043.9	1.5	0.0						
			6	0.0	0.0	47.9	0.4	0.0	29.4	0.0	0.0	39.9	0.5	0.0	4.0	0.3	0.1	-97.2	1.0	0.0						
			5	0.0	0.0	55.2	0.5	0.0	30.1	0.0	0.0	70.7	0.5	0.0	2.4	0.4	0.2	488.6	0.6	0.0						
			1	0.0	0.0	3.6	0.1	0.0	12.1	0.0	0.0	13.7	0.1	0.0	2.7	0.1	0.0	-22.4	0.1	0.0						
			5	0.0	0.0	55.1	0.5	0.0	32.3	0.0	0.0	68.3	0.5	0.0	7.4	0.4	0.1	877.7	1.3	0.0						
			0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	4.4	0.0	0.0	6.2	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0						
			5	0.0	0.0	55.5	0.5	0.0	32.4	0.0	0.0	78.2	0.5	0.0	7.6	0.4	0.1	714.4	0.6	0.0						
			1	0.0	0.0	4.3	0.1	0.0	12.1	0.0	0.0	14.8	0.1	0.0	4.3	0.1	0.0	-22.4	0.1	0.0						
			5	0.0	0.0	48.0	0.5	0.0	29.7	0.0	0.0	39.3	0.5	0.0	3.5	0.5	0.1	97.5	0.6	0.0						
			1	0.0	0.0	92.7	0.9	0.0	59.9	0.0	0.0	99.0	1.0	0.0	7.9	0.8	0.1	1169.4	1.7	0.0						
			5	0.0	0.0	49.3	0.4	0.0	34.6	0.0	0.0	45.5	0.5	0.0	5.6	0.4	0.1	116.8	0.6	0.0						
			0	0.0	0.0	2.6	0.0	0.0	3.7	0.0	0.0	39.6	0.0	0.0	6.3	0.0	0.0	162.5	0.2	0.0						
			5	0.0	0.0	48.1	0.5	0.0	29.7	0.0	0.0	39.8	0.5	0.0	4.4	0.5	0.1	-97.5	0.6	0.0						
			0	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	5.5	0.0	0.0	3.3	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0						
			6	0.0	0.0	48.1	0.4	0.0	32.2	0.0	0.0	39.5	0.5	0.0	6.7	0.3	0.0	-69.0	1.2	0.0						
			5	0.0	0.0	49.0	0.5	0.0	37.0	0.0	0.0	45.6	0.5	0.0	5.3	0.4	0.1	118.4	1.2	0.0						
			1	0.0	0.0	92.8	0.9	0.0	61.8	0.0	0.0	103.1	1.0	0.0	10.2	0.8	0.1	1050.5	1.7	0.0						
			6	0.0	0.0	47.9	0.4	0.0	32.3	0.0	0.0	39.3	0.5	0.0	6.0	0.3	0.1	-98.9	1.2	0.0						

Palmarès des systèmes
'instrumentation

ment de 9
% dans un délai

Application au pont des Gaubourgs :

En définitive, la démarche proposée :

- permet d'évaluer de manière quantifiée et objective la performance du dispositif complet (capteurs, traitement, analyse) grâce à l'indicateur VCR, et de l'optimiser avant de le déployer, sans sur-instrumenter.

- fournit au gestionnaire un critère d'arbitrage clair : un délai de détection maximal garanti pour un scénario d'endommagement donné.

- peut être rapidement reproduite sur n'importe quel ouvrage modélisable.

Conférences Techniques
TERRITORIALES



Stratégie d'exploitation

J

DIRECTION VOIRIE COMMUNAUTAIRE ET ESPACE PUBLIC
Service Gestion du Patrimoine – Unité Ouvrages d'Art
83, rue du Mail - BP 80011 - 49020 ANGERS Cedex 02 • Tél : 02 41 21 54 49 / 27
www.angers.fr • nicolas.lebas@angersloiremetropole.fr

SIXENSE

un TERRITOIRE EN MOUVEMENT

angers loire métropole

Stratégie d'exploitation de l'ouvrage

Evaluation de l'ouvrage

- Identification de désordres
- Diagnostic structure

Recalcul capacité portante

- Capacité inférieure aux circulations accueillies y compris si réparation
- Le remplacement de l'ouvrage est à l'étude (ou sa réparation mais sous charges plus faibles)
- Nécessité surveillance renforcée

Conception instrumentation

Définition de l'instrumentation (détection vieillissement prématuré de la structure)

Test de l'instrumentation

- Test de l'instrumentation au cas précis de l'ouvrage
- Définition du cahier des charges

Instrumentation

Mise en place de l'instrumentation (surveillance renforcée)

Haute surveillance ?

Si l'accélération du vieillissement de l'ouvrage

Merci de votre attention

