

# “ Analyse de risque des ponts en situation de crue

Méthodologie développée et premières  
applications opérationnelles

”

- Des phénomènes météorologiques violents frappent régulièrement le territoire national et impactent fortement les régimes des cours d'eau : *cyclones à la Réunion, épisodes cévenols sur l'Hérault, l'Aude ou le Gard, inondations sur les Bouches-du-Rhône, le Vaucluse, le Var ou les Alpes-Maritimes...*



*Effondrement du pont sur la rivière St-Etienne à la Réunion suite au passage du cyclone Gamède (2007)*

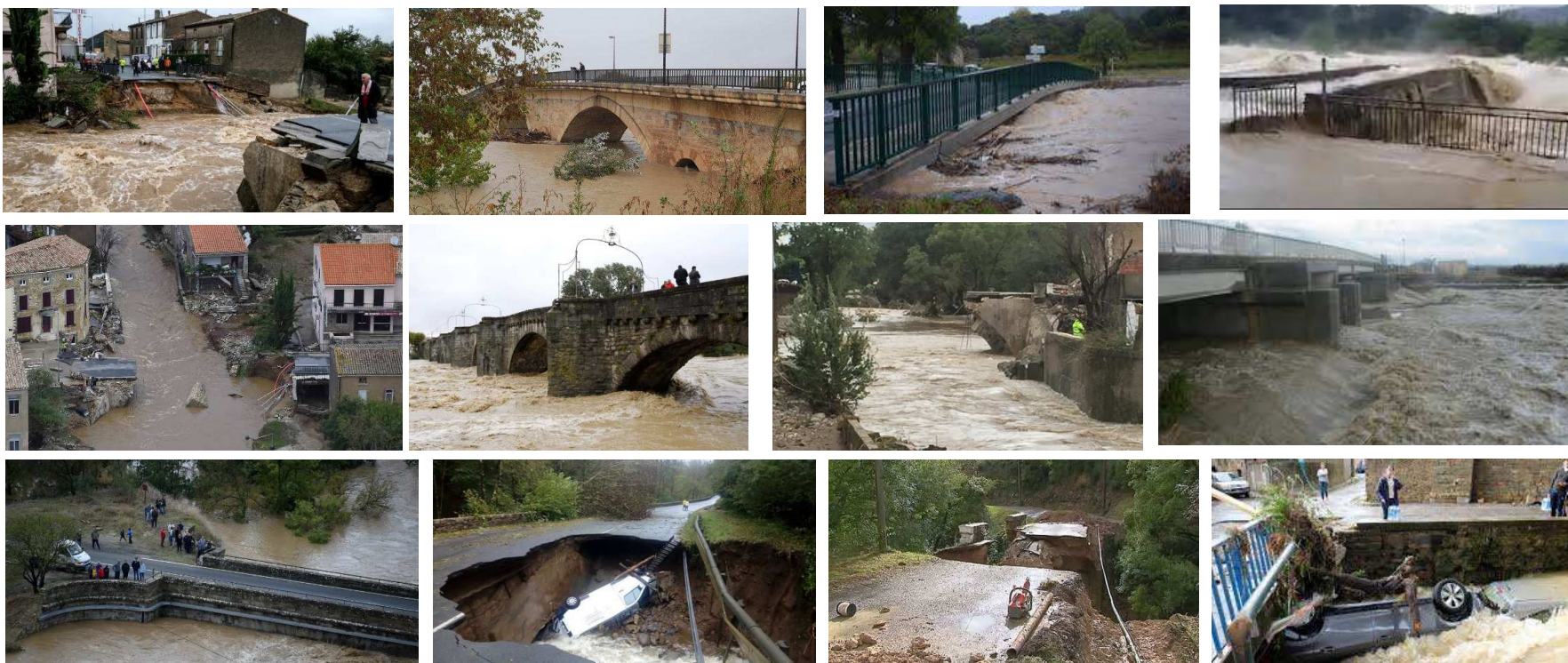


*Effondrement d'une berge du pont sur le Batailler au Lavandou (83) suite aux inondations du Var (2014)*

# Genèse de la démarche

Biennale  
des territoires 2019

- Des phénomènes météorologiques violents frappent régulièrement le territoire national et impactent fortement les régimes des cours d'eau :

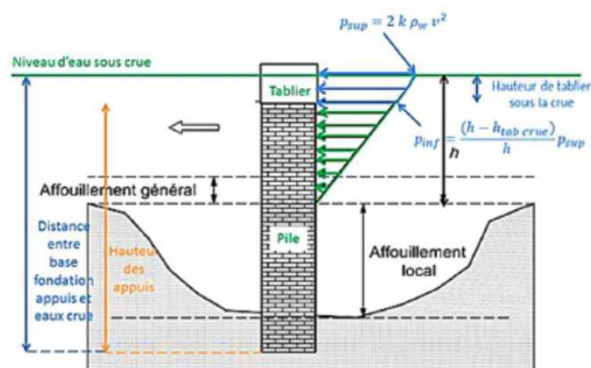


*Inondations dans l'Aude en octobre 2018*

*Sources : presses diverses*



- Les différents services en charge du dimensionnement et de la justification des ponts du Cerema (*services hydrauliques, géotechniques, ouvrages d'art*) ont été amenés à développer des compétences particulières sur l'évaluation et la prise en compte des effets pouvant résulter des crues sur les ouvrages qui franchissent ces cours d'eau :
  - Poussée liée à la vitesse du courant sur les parties en contact avec l'eau
  - Affouillement(\*) des fondations



(\*) Affouillement :  
Creusement du sol sous l'action des tourbillons qui se forment autour des appuis faisant obstacles à l'écoulement

- Fort de cette expérience, le Cerema a mobilisé un groupe de travail pour la rédaction d'un guide pour l'« *Analyse de risque des ponts en site affouillable* »



(Publication prochaine  
via la boutique Cerema)

- Finalité :

- Décliner la démarche générale d'analyse de risque des ouvrages du Cerema au cas particulier des ouvrages en site affouillable
- Proposer une méthode pragmatique et efficace de recensement et de traitement des ouvrages les plus sensibles et exposés, en répondant à la double exigence :
  - De permettre d'analyser un patrimoine important d'ouvrages à partir d'un nombre réduit de paramètres facilement accessibles pour les gestionnaires (*applicabilité*)
  - De garantir une représentativité suffisante de phénomènes considérés (*pertinence scientifique*)



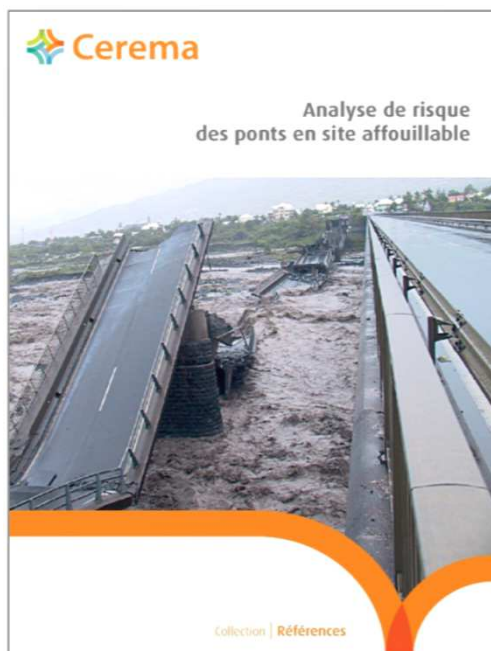
(Publication prochaine  
via la boutique Cerema)




# Méthode générale proposée

Biennale  
des territoires 2019

- 3 étapes successives correspondant à un raffinement croissant de l'analyse et permettant de resserrer progressivement le périmètre d'étude :

1. Analyse sommaire qualitative
2. Analyse simplifiée semi-quantitative
3. Analyse détaillée




<p>Étape 1 : Analyse sommaire (préfère préalable par approche qualitative)</p>		<p><b>Objectif :</b> Identification préalable du patrimoine d'ouvrages d'art devant faire l'objet d'une analyse vis-à-vis du risque affouillement.</p> <p><b>Cible :</b> Parc étendu d'ouvrages</p> <p><b>Critères de hiérarchisation privilégiés :</b> Eaux stratégiques (conséquences) - aléa, vulnérabilité succinets</p> <p><b>Méthode/outil :</b> Matrice de risque 3 (aléa) x 3 (vulnérabilité) x 3 (importance)</p> <p><b>Données d'entrée nécessaires :</b> Données générales facilement accessibles par géomatique</p>
<p>Étape 2 : analyse simplifiée des risques (approche semi-quantitative)</p>		<p><b>Objectif :</b> Evaluation simplifiée du risque associé à chaque ouvrage permettant de définir les actions à entreprendre par le gestionnaire : surveillance normale, investigations complémentaires ou analyse détaillée</p> <p><b>Cible :</b> Ouvrages retenus à l'issue de l'étape 1</p> <p><b>Critères de hiérarchisation privilégiés :</b> Eaux stratégiques, aléa, vulnérabilité (ponds équivalent)</p> <p><b>Méthode/outil :</b> Matrice de risque 5 (aléa) x 5 (vulnérabilité) x 3 (importance)</p> <p><b>Données d'entrée nécessaires :</b> Dossier d'ouvrage (plans généraux et appuis) + reconnaissance visuelle sur site + données hydrogéologiques générales</p>
<p>Étape 3 : Analyse détaillée des risques (modélisation numérique ou physique)</p>		<p><b>Objectif :</b> Qualification précise du risque d'affouillement et définition des mesures de traitement du risque (surveillance spécifique, renforcement...)</p> <p><b>Cible :</b> Ouvrages individuels les plus critiques retenus à l'issue de l'étape 2, ou résultant d'un processus décisionnel au cas par cas</p> <p><b>Critères de hiérarchisation privilégiés :</b> Aléa/vulnérabilité</p> <p><b>Méthode/outil :</b> Expertise, évaluation quantitative (modélisation numérique), recalcul structure + modélisation hydrogéologique</p> <p><b>Données d'entrée nécessaires :</b> Dossier OA complet (notes de calcul, hypothèses générales et géotechniques) + investigations hydrogéologiques complémentaires</p>

# Méthode générale proposée

Biennale  
des territoires 2019

- 3 étapes successives correspondant à un raffinement croissant de l'analyse et permettant de resserrer progressivement le périmètre d'étude :
  1. Analyse sommaire qualitative

<p><b>Etape 1 : Analyse sommaire (préfiltre préalable par approche qualitative)</b></p>		<p><b>Objectif :</b> Identification préalable du patrimoine d'ouvrages d'art devant faire l'objet d'une analyse vis-à-vis du risque affouillement.</p> <p><b>Cible :</b> Parc étendu d'ouvrages</p> <p><b>Critères de hiérarchisation privilégiés :</b> Enjeux stratégiques (conséquences) &gt; aléa, vulnérabilité succincts</p> <p><b>Méthode/outil :</b> Matrice de risque 3 (aléa) x 3 (vulnérabilité) x 5 (importance)</p> <p><b>Données d'entrée nécessaires :</b> Données générales facilement accessibles par gestionnaire</p>
---	---	--

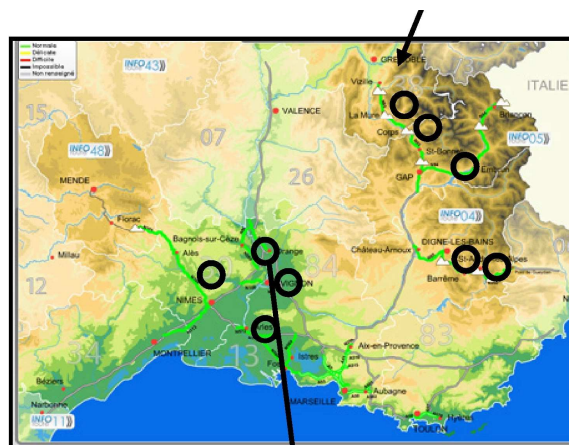


# Méthode générale proposée

Biennale  
des territoires 2019

- 3 étapes successives correspondant à un raffinement croissant de l'analyse et permettant de resserrer progressivement le périmètre d'étude :
  1. Analyse simplifiée qualitative
  2. Analyse simplifiée semi-quantitative
  3. Analyse quantitative

Étape 2 : analyse simplifiée des risques  
(approche semi-quantitative)



**Objectif :** Evaluation simplifiée du risque associé à chaque ouvrage permettant de définir les actions à entreprendre par le gestionnaire : surveillance normale, investigations complémentaires ou analyse détaillée

**Cible :** Ouvrages retenus à l'issue de l'étape 1

**Critères de hiérarchisation privilégiés :** Enjeux stratégiques, aléa, vulnérabilité (poids équivalent)

**Méthode/outil :** Matrice de risque 5 (aléa) x 5 (vulnérabilité) x 5 (importance)

**Données d'entrée nécessaires :** Dossier d'ouvrage (plans généraux et appuis) + reconnaissance visuelle sur site + données hydrogéologiques générales



- 3 étapes successives correspondant à un raffinement croissant de l'analyse et permettant de resserrer progressivement le périmètre d'étude :

### 3. Analyse détaillée

<p><b>Etape 3 : Analyse détaillée des risques</b> (modélisation numérique ou physique)</p>		<p><b>Objectif :</b> Qualification précise du risque d'affouillement et définition des mesures de traitement du risque (surveillance spécifique, renforcement...)</p> <p><b>Cible :</b> Ouvrages individuels les plus critiques retenus à l'issue de l'étape 2, ou résultant d'un processus décisionnel au cas par cas</p> <p><b>Critères de hiérarchisation privilégiés :</b> Aléa/vulnérabilité</p> <p><b>Méthode/outil :</b> Expertise, évaluation quantitative (modélisation numérique), recalcul structure + modélisation hydrogéologique</p> <p><b>Données d'entrée nécessaires :</b> Dossier OA complet (notes de calcul, hypothèses générale et géotechniques) + investigations hydrogéologiques complémentaires</p>
--	---	--

# Méthode générale proposée

Biennale  
des territoires 2019

- Critères d'évaluation simplifiés de l'aléa (étape 1)
  - Conditions d'écoulement (rivières fluviales ou torrentielles...)
  - Nature du fond de lit (rocheux, alluvionnaire...)
  - Effet de contraction locale du lit
  - Dimensions et forme des piles
  - Mobilité du lit...



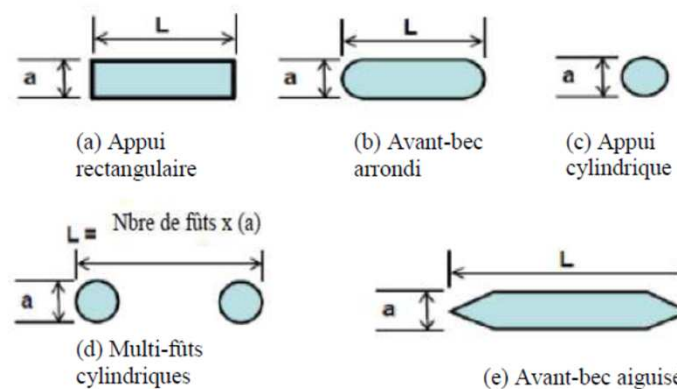
Ouvrage fluvial au débouché hydraulique sous dimensionné (photo: LR de Blois)



Exemple de banc d'alluvions à nu indiquant un lit mobile (photo: LR de Blois)



Exemple d'ouvrage sur fond rocheux (photo: DIR Atlantique)



# Méthode générale proposée

Biennale  
des territoires 2019

## • Critères d'évaluation simplifiés de l'aléa (étape 2)

- Estimation des profondeurs d'affouillement à partir d'équations simplifiées issues de la littérature scientifique et de données quantifiées :

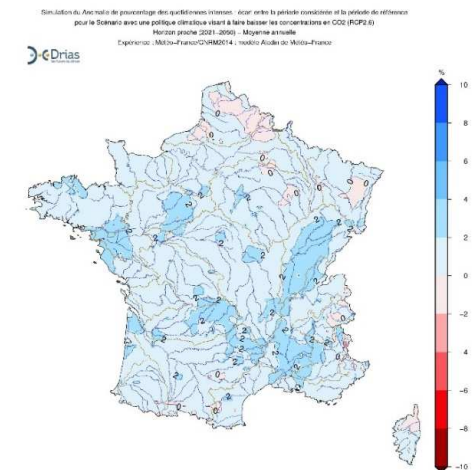
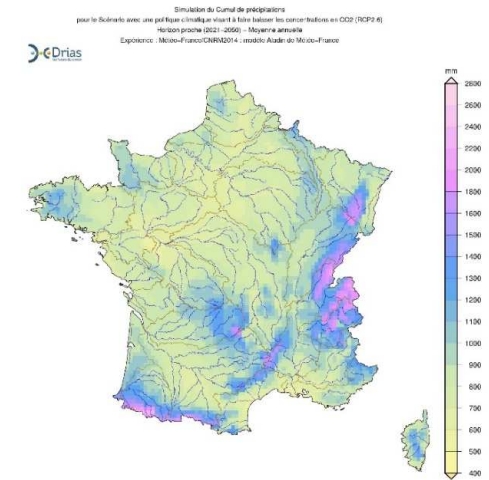
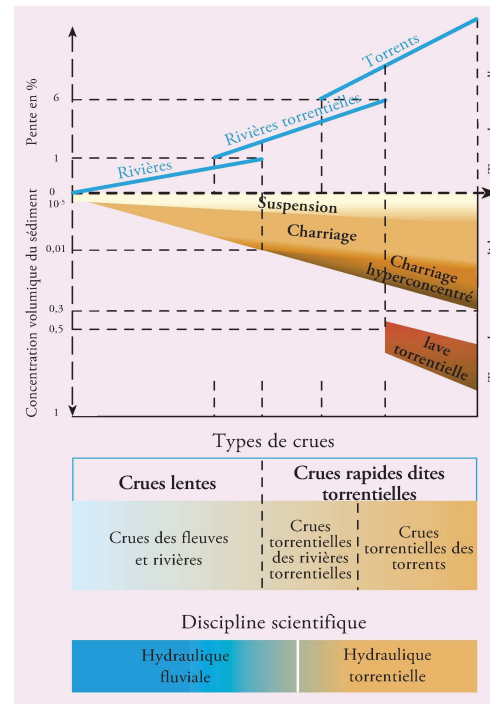
$$P_1 = 0,73 \cdot q^{2/3} / d^{1/6} - y \quad (\text{Formule de Ramette})$$

$$y_2/y_1 = (Q_2/Q_1)^{6/7} \cdot (W_1/W_2)^{k1} \quad \text{et} \quad P_2 = y_2 - y_0$$

$$P_3 = 2 K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot a^{0,65} \cdot y^{0,35} \cdot Fr^{0,43} \quad (\text{Formule de Laursen})$$

(Formule de l'Univ. Colorado)

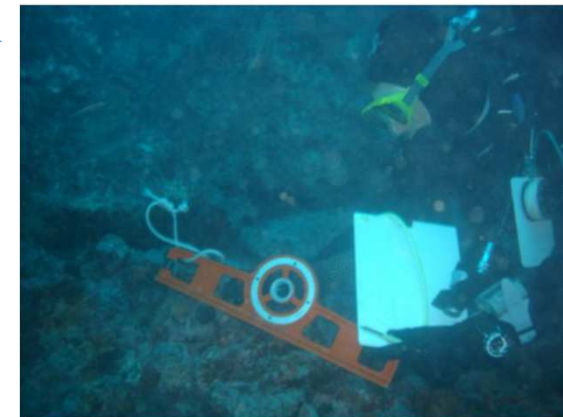
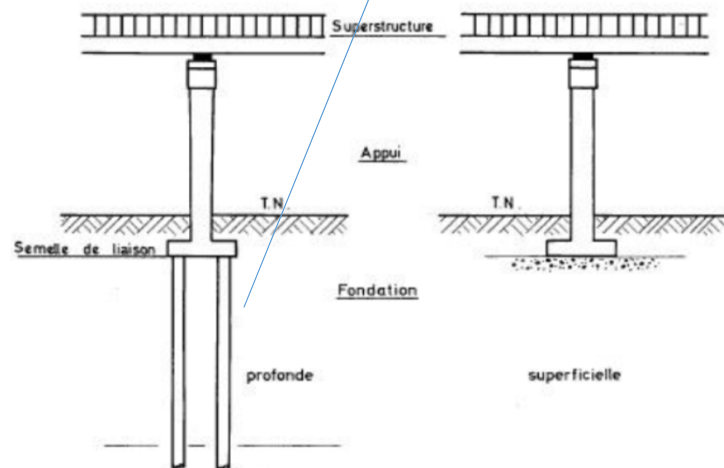
- Évaluation des vitesses d'écoulement pour différentes configurations ou pentes de cours d'eau
- Prise en compte des effets du changement climatique par majoration forfaitaire des critères impactés par une augmentation de précipitation ou de débit supérieure à 10 ou 20% à l'horizon 2100



# Méthode générale proposée

Biennale  
des territoires 2019

- Critères d'évaluation simplifiés de la vulnérabilité (étape 1)
  - Période de construction (  $\_ < 1950 - 1975 < \_$  )
  - Type de fondations (semelle, pieux en béton armé, pieux en bois...)
  - Observation récente d'absence de phénomène d'affouillement?
  - Géométrie et état des appuis
  - « Souplesse » de la structure...



Visite subaquatique

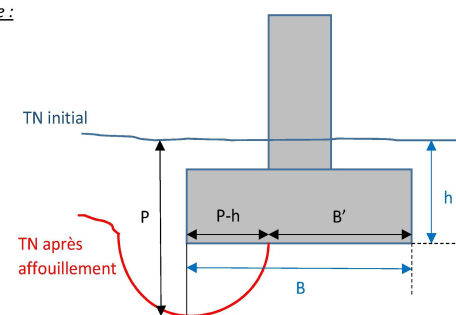


- Critères d'évaluation simplifiés de la vulnérabilité (étape 2)

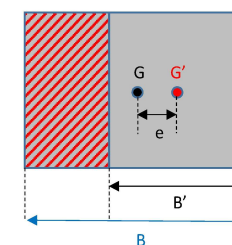
Précisions et compléments apportés sur certains critères

- Type de fondations :
  - Profondes  $V_{12} = 1$
  - Semi-profondes (yc pieux bois non dégarnis et semelles sur gros béton)  $V_{12} = 2$
  - Superficielle à large embase ( $e \leq B'/6$ )  $V_{12} = 3$
  - Superficielle à embase moyenne ( $B'/6 < e \leq B'/3$ )  $V_{12} = 5$
  - Superficielle à embase étroite ( $e > B'/3$ )  $V_{12} = 10$
  - Micropieux ou pieux bois dégarnis  $V_{12} = 10$
- Surveillance :
  - Visite récente (inspection  $\leq 6$  ans)  $\Rightarrow$  pas d'affouillement observé  $V_{13} = 0$
  - Visite récente (inspection  $\leq 6$  ans)  $\Rightarrow$  initiation d'affouillement observée\*  $V_{13} = 2$
  - Fondations non inspectées depuis 7 à 10 ans  $V_{13} = 2$
  - Fondations non inspectées depuis plus de 10 ans  $V_{13} = 4$
- Etat des appuis (y compris éléments de protection éventuels) :
  - 1 ou 2 ou 2E  $V_{23} = 0$
  - 3 ou 3U ou NE  $V_{23} = 1$
- Sensibilité du tablier à la flexion :
  - Travées isostatiques  $V_{32} = 0$
  - Travées hyperstatique structure mixte  $V_{32} = 0,5$
  - Travées hyperstatique structure béton  $V_{32} = 1$

Vue latérale :



Vue de dessus :



# Méthode générale proposée

Biennale  
des territoires 2019

## • Critères d'évaluation des enjeux ou conséquences (étapes 1 et 2)

Facteurs représentatifs des enjeux (adaptés légèrement à la problématique affouillements et crise inondation)	Critères	Cotation
<b>Importance de la voie portée (A)</b> Fonction du caractère plus ou moins stratégique de l'itinéraire, des conséquences d'un effondrement sur le cours d'eau franchi et du rôle de l'ouvrage en cas de crise inondation	Cas général	0,5
	Stratégique	1
	Très stratégique	2
	Conséquences moyennes sur voie franchie	(+1)
	Conséquences élevées sur voie franchie	(+2)
	Ouvrage portant des réseaux essentiels en situation de crise ou desservant une zone urbanisée sensible exposée au risque inondation	(+2)
<b>Niveau de trafic (B)</b> Conséquences socio-économiques fonction du trafic total sur la voie portée (intègre également indirectement le risque de victimes directes sur l'ouvrage en cas d'effondrement)	< 1 000 v/j	1
	entre 1 000 v/j et 15 000 v/j	1,5
	entre 15 000 v/j et 50 000 v/j	2
	> 50 000 v/j	2,5
<b>Valeur patrimoniale de l'ouvrage, (C)</b> fonction notamment de la surface tablier et de la valeur historique de l'ouvrage	S < 100 m <sup>2</sup>	0,5
	100 ≤ S < 500 m <sup>2</sup>	1
	500 ≤ S < 1000 m <sup>2</sup>	1,5
	1000 ≤ S < 2000 m <sup>2</sup>	2
	2000 m <sup>2</sup> ≤ S	2,5
	ou valeur patrimoniale historique reconnue	

Conséquences sur le niveau de service (D) Facilité de mise en place d'une déviation ayant la capacité d'absorber le report de trafic, y compris pont de secours en situation de crise	Déviations faciles (Pont attenant ou proche)	0
	Déviations difficiles (Déviation longue)	1,5
	Déviations impossibles (Aucun pont à proximité)	3
	Brèche > 40 m ou site contraint rendant impossible toute installation de pont de secours	(+2)
Potentielles victimes directes associées à l'effondrement de l'ouvrage (E) Selon présence ou non de barrière physique prévue en cas de crue, et inspection systématique ou non suite à chaque épisode	Barrière physique prévue interdisant l'accès à l'ouvrage en cas de crue	0
	Cas général	2
	Ouvrage présumé vulnérable et n'ayant fait l'objet d'aucune inspection spécifique de ses fondations suite au dernier phénomène de crue important subi	4

Niveau de conséquences	
Très Faible	0 ≤ ISE < 4
Faible	4 ≤ ISE < 8
Moyen	8 ≤ ISE < 12
Elevé	12 ≤ ISE < 16
Très élevé	16 ≤ ISE ≤ 20

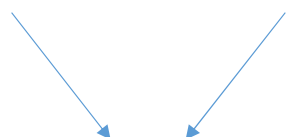
# Méthode générale proposée

Biennale  
des territoires 2019

- Indices de **danger (ou criticité)** obtenus par croisement des indices d'**aléa** et de **vulnérabilité**

## Etape 1 :

Niveau d'aléa - étape 1		Niveau de vulnérabilité - étape 1	
Faible	$A < 3$	Faible	$V \leq 8$
Moyen	$3 \leq A < 7$	Moyen	$8 < V \leq 12$
Elevé	$A \geq 7$	Elevé	$V > 12$



Danger/criticité	Vulnérabilité faible	Vulnérabilité moyenne	Vulnérabilité forte
Aléas faibles	Criticité faible	Criticité faible	Criticité moyenne
Aléas moyens	Criticité faible	Criticité moyenne	Criticité forte
Aléas forts	Criticité moyenne	Criticité forte	Criticité forte

## Etape 2 :

Niveau d'aléa - étape 2		Niveau de vulnérabilité - étape 2	
Très Faible	$P < 1 \text{ m}$	Très Faible	$V \leq 4$
Faible	$1 \leq P < 3 \text{ m}$	Faible	$4 < V \leq 8$
Moyen	$3 \leq P < 6 \text{ m}$	Moyen	$8 < V \leq 12$
Elevé	$6 \leq P < 12 \text{ m}$	Elevé	$12 < V \leq 16$
Très élevé	$P \geq 12 \text{ m}$	Très élevé	$V > 16$



		Vulnérabilité				
		Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Aléa	Très faible	Très faible	Très faible	Faible	Faible	Faible
	Faible	Très faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne
	Moyen	Faible	Faible	Moyenne	Elevée	Elevée
	Elevé	Faible	Moyenne	Elevée	Elevée	Très élevée
	Très élevé	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée	Très élevée

# Méthode générale proposée

Biennale  
des territoires 2019

- Indices de **risque** obtenus par croisement des indices de **criticité** et de **conséquences**

Danger/criticité	Vulnérabilité faible	Vulnérabilité moyenne	Vulnérabilité forte
Aléas faibles	Criticité faible	Criticité faible	Criticité moyenne
Aléas moyens	Criticité faible	Criticité moyenne	Criticité forte
Aléas forts	Criticité moyenne	Criticité forte	Criticité forte

Niveau de conséquences	
Très Faible	$0 \leq ISE < 4$
Faible	$4 \leq ISE < 8$
Moyen	$8 \leq ISE < 12$
Elevé	$12 \leq ISE < 16$
Très élevé	$16 \leq ISE \leq 20$

Danger/criticité	Vulnérabilité				
	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Très faible	Très faible	Très faible	Faible	Faible	Faible
Faible	Très faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne
Moyen	Faible	Faible	Moyenne	Elevée	Elevée
Elevé	Faible	Moyenne	Elevée	Elevée	Très élevée
Très élevé	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée	Très élevée

## Etape 1 :

Risque	Criticité faible	Criticité moyenne	Criticité forte
Conséquences très faibles	Risque très faible à faible		
Conséquences faibles	Risque très faible à faible		Risque moyen à élevé
Conséquences moyennes	Risque très faible à faible	Risque moyen à élevé	
Conséquences élevées	Risque très élevé		
Conséquences très élevées	Risque très élevé		

Il est conseillé de concentrer la suite de la démarche sur les ouvrages dont le niveau de risque à l'issue de cette première étape est moyen à élevé ou très élevé.

## Etape 2 :

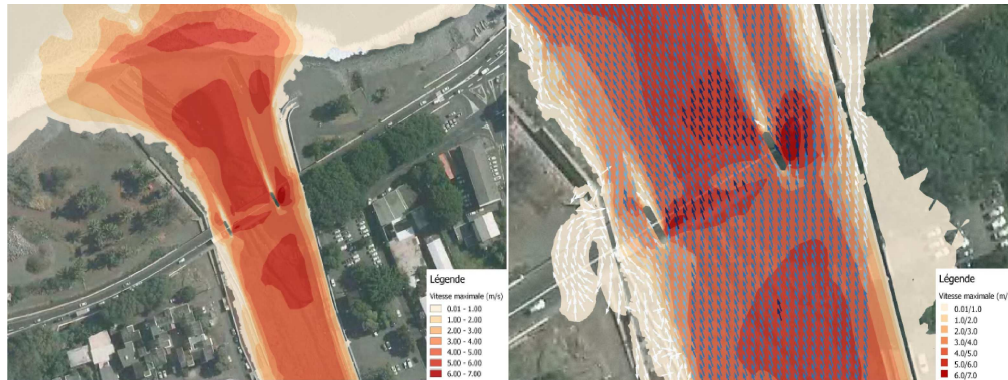
Risque	Criticité très faible	Criticité faible	Criticité moyenne	Criticité élevée	Criticité très élevée
Conséquences très faibles	Ouvrages exclus à l'issue de la 1 <sup>re</sup> phase				
Conséquences faibles	Risque faible	Risque faible	Risque faible	Risque moyen	Risque moyen
Conséquences moyennes	Risque faible	Risque faible	Risque moyen	Risque moyen	Risque élevé
Conséquences élevées	Risque faible	Risque moyen	Risque moyen	Risque élevé	Risque élevé
Conséquences très élevées	Risque moyen	Risque moyen	Risque élevé	Risque élevé	Risque élevé



# Méthode générale proposée

Biennale  
des territoires 2019

- Méthodes d'évaluation détaillée et traitement du risque



Modèle numérique 2D (rivière St-Denis – La Réunion)

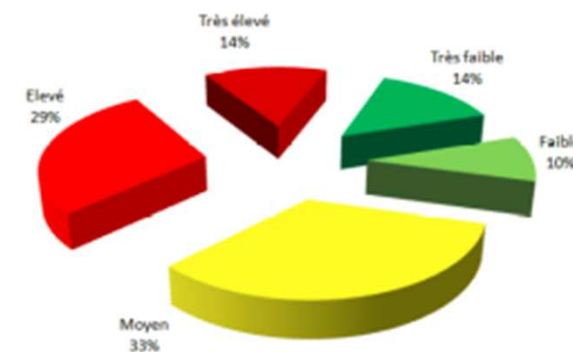


Protection d'une culée de pont (rivière du Mat – La Réunion)



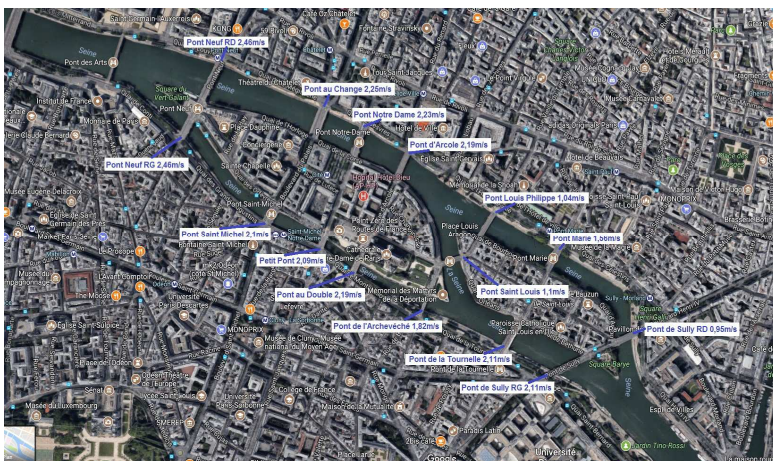
Modélisation physique (viaduc de la LEO – Avignon)

- Études tests destinés à valider la démarche (*applicabilité, pertinence technique, niveau de sélectivité...*)
  - 4 ouvrages Réunionnais de franchissement de rivières torrentielles
  - 11 ouvrages en PACA dont certains endommagés lors des inondations du Var de 2014
  - 6 ouvrages du Nord-Ouest de la France ayant fait l'objet d'études d'affouillement approfondies
  - Retours d'expérience sur l'application de la méthode dans le cadre du projet de recherche ANR SSHEAR "Sols, Structures et Hydraulique : Expertise et Recherche Appliquée" ([www.sshear.ifsttar.fr](http://www.sshear.ifsttar.fr))





- Déclinaison de la démarche dans le cadre de l'analyse de risque des ouvrages d'Ile-de-France en situation de crue (pour la Préfecture de Police de Paris)
  - Patrimoine concerné : environ 250 ponts sur les seuls cours d'eau navigables (*dans un 1er temps : réseau structurant autoroutes pénétrantes + périph + grands axes gérés par l'Etat + ponts « parisiens »*)
  - Scénario : crue historique de 1910 majorée de 15%
  - Finalité : pouvoir discerner les ouvrages robustes de ceux qui sont plus vulnérables, afin de bâtir un plan de gestion de trafic fiable en période de crue et proposer le cas échéant les investissements de remise à niveau les plus pertinents

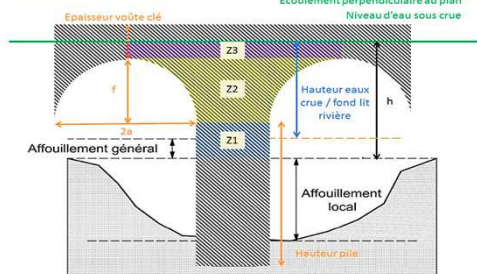
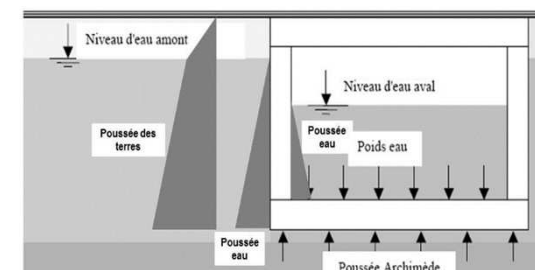
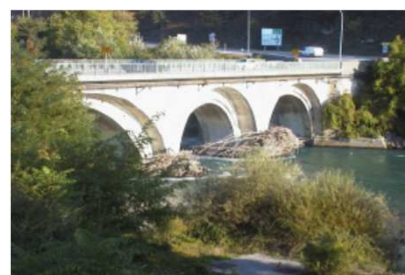


Crue 1910

# Applications opérationnelles

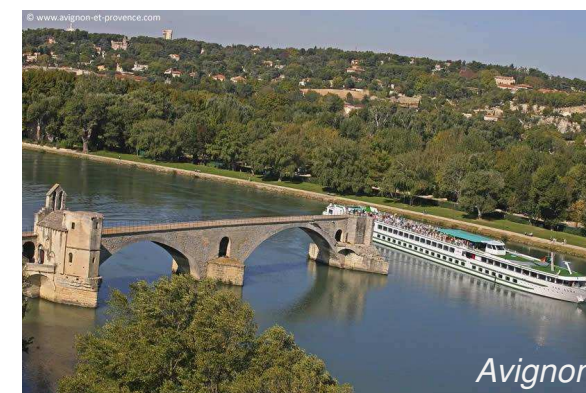
Biennale  
des territoires 2019

- Autres risques étudiés (*en plus du phénomène affouillement*), selon le même type d'approche :
  - **Poussée hydrodynamique** induite par la vitesse du courant sur les piles faisant obstacle à l'écoulement
  - **Embâcles** (stockage de débris autour des appuis se traduisant par une aggravation des phénomènes)
  - **Chocs de bateaux en perdition** (en cas par exemple de rupture accidentelle des amarres)
  - **Décrués rapides** (pression différentielle sur les murs latéraux si mal drainés)





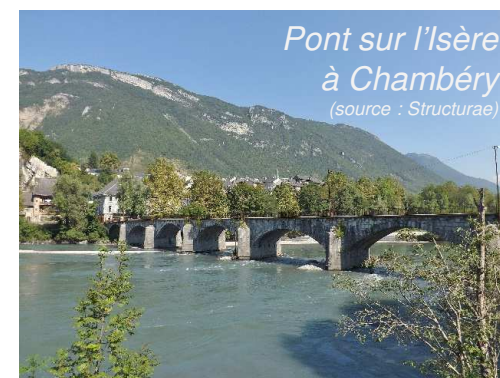
- Volonté du Cerema de consolider la méthode en l'étendant au niveau national à d'autres cours d'eau correspondant à des contextes hydrogéologiques ou des conditions d'exploitation différents :
  - **Loire** : Démarche partenariale de type R&D en cours de montage avec la Métropole de Nantes
  - **Partie Sud du Rhône et autres cours d'eau du Sud de la France** : appui au déploiement de la méthode au réseau autoroutier Vinci-ASF + **Appel à partenariats** auprès des gestionnaires locaux (*Etat, collectivités territoriales...*)



- Volonté du Cerema de consolider la méthode en l'étendant au niveau national à d'autres cours d'eau correspondant à des contextes hydrogéologiques ou des conditions d'exploitation différents :
  - **Rivières torrentielles de montagne : Appel à partenariats** auprès des gestionnaires locaux (*Etat, collectivités territoriales, concessionnaires autoroutiers...*)



Avignon



**Merci pour votre attention**  
et n'hésitez pas à rejoindre le partenariat...

**Contact :**

[denis.davi@cerema.fr](mailto:denis.davi@cerema.fr)

04 42 24 76 81 (ou 04 67 20 95 83)

