

CONFERENCE TECHNIQUE TERRITORIALE

RESILIENCE ET OUVRAGES D'ART: DU CONSTAT À L'ACTION

Cerema Méditerranée Aix en Provence

MARDI

31
mai
2022



L'intégration de la résilience dans la conception des OA

RAPPEL DES PRINCIPES DE ROBUSTESSE

Denis Davi

Pôle « Réduction des risques sismiques et hydrauliques appliquée aux Ouvrages d'Art »

Cerema Méditerranée



SOMMAIRE

- Le concept de robustesse
- Etat de l'art
- Principes de détermination de la robustesse des structures
- Quelques exemples d'applications opérationnelles du concept de robustesse

(Éléments largement extraits du guide Sétra de janv. 2013 :
« *Maîtrise des risques – Application aux ouvrages d'art* »
§6 – Robustesse des ouvrages)



LE CONCEPT DE ROBUSTESSE

Définition

EC1, partie 1-7 : « Une défaillance locale due à une **cause inconnue** ne doit pas avoir de **conséquences disproportionnées** »

- **Causes inconnues, ou mal connues et aléatoires :**

Externes :

- malveillance, vandalisme ;
- terrorisme ;
- incendie (camion transportant ou non des matières dangereuses) ;
- explosion (transports matières dangereuses, conduite gaz...) ;
- chocs (véhicule, camion, grue...) ;
- chute d'éléments (liée à l'activité humaine ou à un événement naturel (chute de blocs) ;
- événement naturel catastrophique exceptionnel dans une région (séisme, cyclone, crue, orage...).

Internes :

- corrosion excessive (armatures de béton armé, torons de câbles de précontrainte...) ;
- fatigue des éléments métalliques ;
- malfaçon à la mise en œuvre non décelée (soudure, boulonnage, recouvrement d'armatures, mauvaise injection de câbles de précontrainte...) ;
- qualité médiocre des matériaux (résistance plus faible que ce qui est requis, fragilité extrême sous certaines conditions de température...).

- **Conséquences disproportionnées :**

Par exemple si le coût de l'élément critique ≤ 5 à 10% du coût total de l'effondrement qu'il provoque (coût direct de la partie effondrée + *parties adjacentes à démolir/reconstruire* + coûts indirects : *humain, médiatique, social, économique...*)

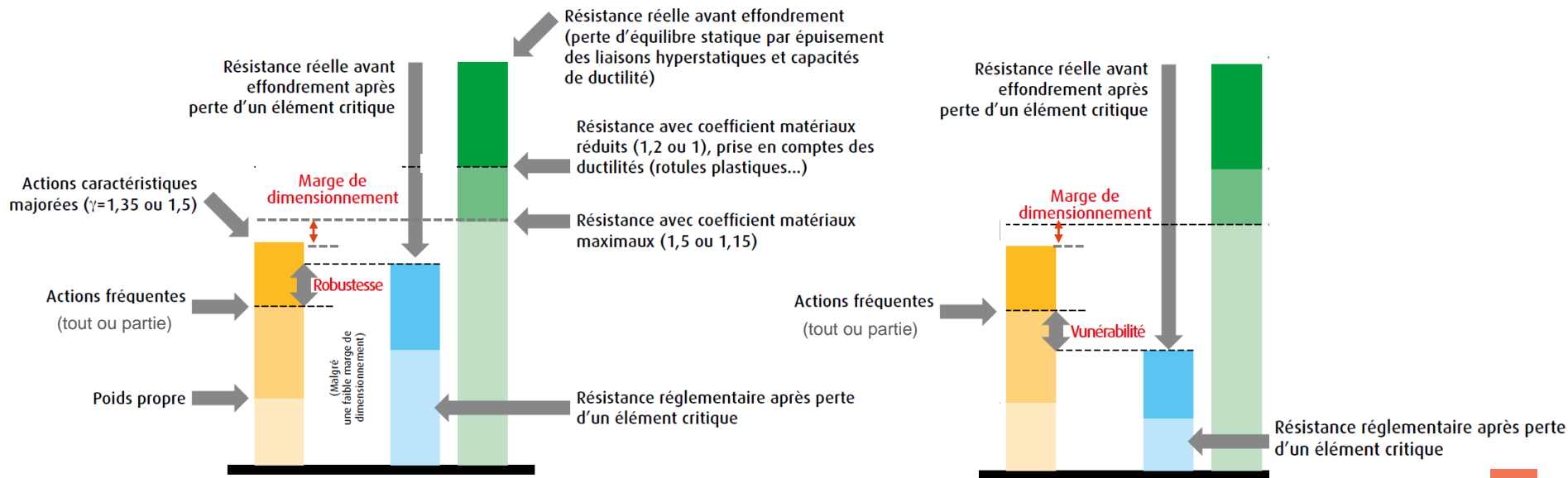
LE CONCEPT DE ROBUSTESSE

Définition

➔ **Robustesse** : capacité d'une structure à résister à des actions + ou - importantes malgré la perte d'un de ses éléments constitutifs principaux

(concerne la résistance réelle de la structure avant effondrement et non la résistance conventionnelle purement réglementaire)

➔ S'évalue en supprimant certains de ses éléments constitutifs *(et en faisant décroître consécutivement sa résistance jusqu'à ce que celle-ci soit inférieure à l'action)*



ÉTAT DE L'ART

Causes d'effondrement des ouvrages

(travail actuellement en cours en Cerema de recensement et d'analyse statistique à l'échelle nationale : causes de dommages, typologies d'ouvrage associées, en lien avec niveaux d'entretien et d'exposition...)

Typologie du patrimoine en France

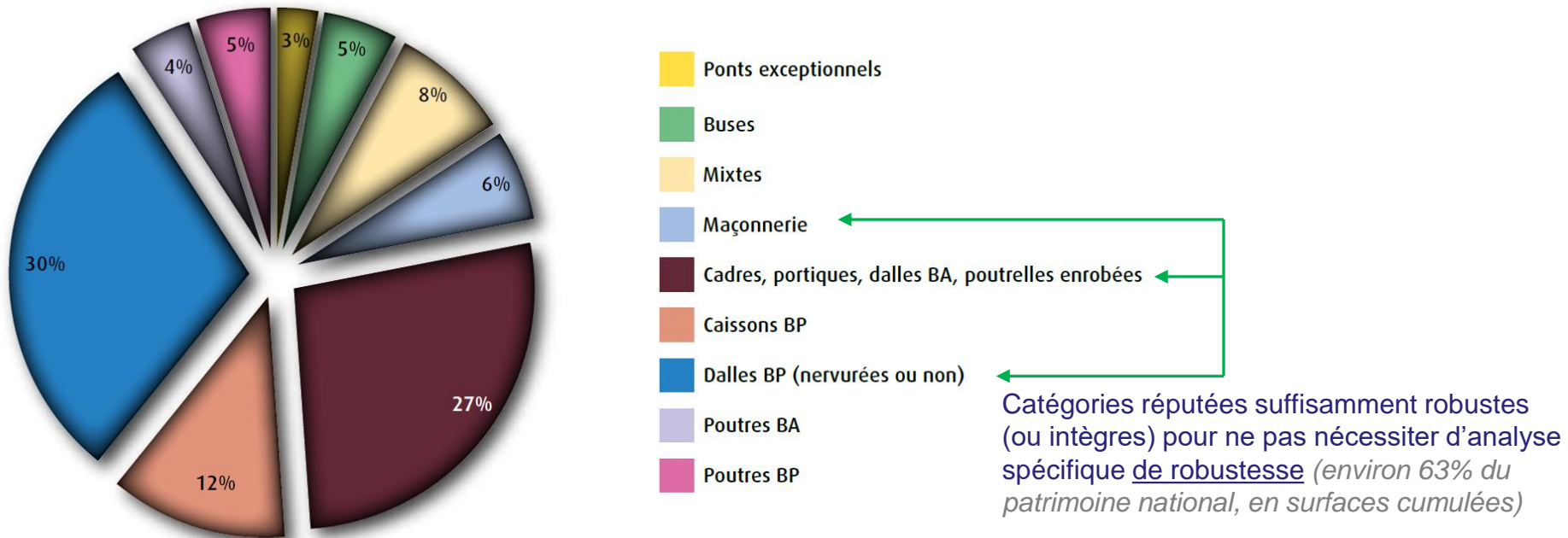


Figure 6-2 : typologie des ouvrages en France, en surfaces cumulées après regroupement par « catégories de robustesse »
(sources : IQOA 2005, 25 000 ouvrages environ)

ÉTAT DE L'ART

Prise en compte de la robustesse sur les ouvrages actuels

- Approches qualitatives (*sens de l'ingénieur, expérience / expertise, conceptions hyperstatiques / redondance structurale...*)

Exemples :

- Surabondance de certains éléments de structure :
 - Ponts à haubans dimensionnés avec un ou plusieurs haubans en moins
 - Piles « multi-fûts » constituées d'un chevron sur pilotis, dimensionnées pour être stables avec une pilette en moins dans le cas des chocs de poids lourds
 - Dans certains cas, redondance de pièces essentielles (tirants)
- Dimensionnement en capacité pour le séisme...
- Approches quantitatives (*dans le cadre d'une analyse détaillée, intégrant des calculs de structure assez raffinés...*)

Exemples :

- Justifications de non fragilité de l'EC2 (*vérification d'une certaine ductilité minimale*)
- Calculs spécifiques par approches « systématiques » (*scénarios prédéfinis*) ou probabilistes (*tirages aléatoires et justification d'une probabilité de défaillance inférieure à une limite jugée acceptable*)

PRINCIPE DE DÉTERMINATION DE LA ROBUSTESSE DES STRUCTURES

Méthodologie

1. Recueil de données (*plans, notes de calcul, caractéristiques matériaux...*)
2. 1^{ère} analyse structurelle
 - Sélection des éléments critiques (*AA, assemblages, soudures, câbles, haubans, éléments essentiels assurant la stabilité structurale, analyse des redondances, éléments fragiles/ductiles...*)
 - Etablissement des scénarios de rupture (*les + probables et/ou les + déterminants pour la structure*)
3. Détermination de la vulnérabilité de l'ouvrage
 - **Approche itérative** (relativement complexe et fine) : *suppression des éléments rompus, vérification des instabilités, plastifications locales et ruptures d'éléments secondaires, redistributions d'efforts internes, effets dynamiques associés aux ruptures fragiles...*
 - Principe : calcul à l'**ELU accidentel** intégrant **50% des charges fréquentes** (*puis selon le résultat, tester l'évolution de la sensibilité entre 0% et 100%*)

PRINCIPE DE DÉTERMINATION DE LA ROBUSTESSE DES STRUCTURES

Conclusions de l'analyse de robustesse

- Niveau de robustesse obtenu à partir de l'**enveloppe** des scénarios de rupture envisagés

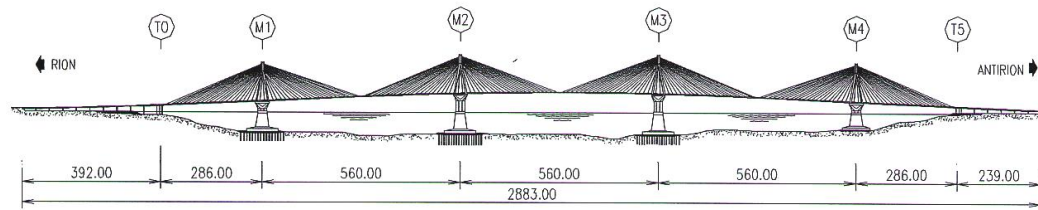
➔ Plusieurs cas de figure :

- L'ouvrage ne supporte pas son poids propre dans les différents scénarios envisagés
➔ **Ouvrage non robuste**
- L'ouvrage supporte uniquement son poids propre ➔ **Robustesse faible**
(niveau acceptable pour ouvrages à faible enjeu ou à mode de rupture ductile)
- L'ouvrage supporte 50% des charges fréquentes ➔ **Robustesse moyenne**
(niveau d'exigence minimal généralement retenu)
- L'ouvrage supporte 100% des charges fréquentes ➔ **Robustesse élevée**
(niveau pouvant être imposé aux ouvrages stratégiques, avec mode de rupture ductile)
- Notion de résistance à adapter selon l'importance de l'élément rompu par rapport aux conséquences. Par exemple :
 - Si coût de l'élément rompu < 5 % coût total de la structure, celle-ci doit résister à l'événement
 - Sinon, si coût de l'élément rompu = x % du coût total de la structure, la surface de tablier effondrée doit être limitée à x % de la surface totale
- **Si exigence de robustesse non satisfaite** ➔ Revoir la conception ou adapter les mesures de suivi (*fréquence et type d'inspections, instrumentation permanente, etc.*)

QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATIONS OPÉRATIONNELLES DU CONCEPT DE ROBUSTESSE

Le principe de dimensionnement en capacité utilisé en conception parasismique – Exemple du pont de Rion-Antirion en Grèce

- Le pont de Rion-Antirion (Source : Vinci construction)



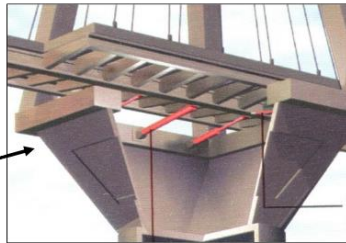
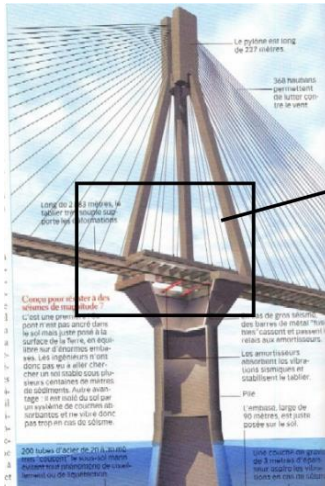
- **Zone fortement sismique** : environ un séisme majeur ($M > 6$) tous les 4 ans
- **Activité tectonique** : écartement des berges de 8 mm/an, pouvant atteindre brutalement 25 cm en cas de fort séisme
- **Sol alluvionnaire liquéfiable**, absence de substratum à moins de 500 m de profondeur
- **Ouvrage conçu pour** :
 - Résister à une d'accélération de 0,48 g ($M=7$, période de retour 2000 ans)
 - Supporter un déplacement de 2 m dans n'importe quelle direction entre 2 pylônes adjacents
 - Rester élastique sous l'effet de vents violents de 250 km/h et d'un choc d'un bateau pétrolier de 180 000 tonnes

QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATIONS OPÉRATIONNELLES DU CONCEPT DE ROBUSTESSE

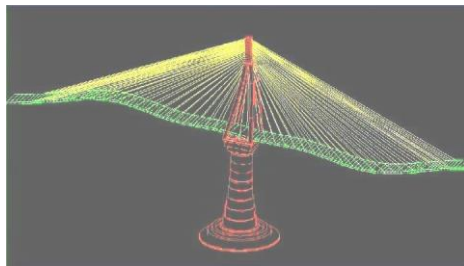
Le principe de dimensionnement en capacité utilisé en conception parasismique – Exemple du pont de Rion-Antirion en Grèce

- Le pont de Rion-Antirion (Source : Vinci construction)

➔ Conception basée sur un certain nombre de systèmes fusibles

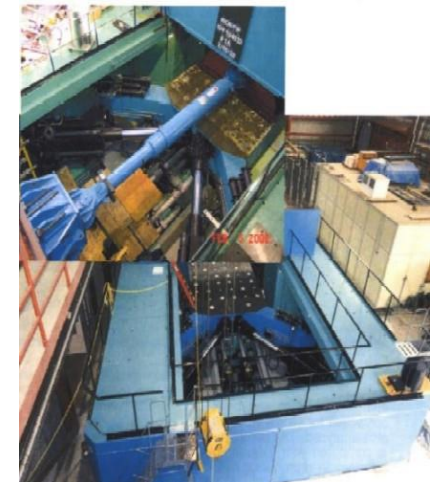


Systèmes fusibles disposés entre le tablier et les pylônes (assouplissement de la structure)



Amortisseurs visqueux prenant le relais des fusibles pour :

- limiter les déplacements
- dissiper une partie de l'énergie sismique



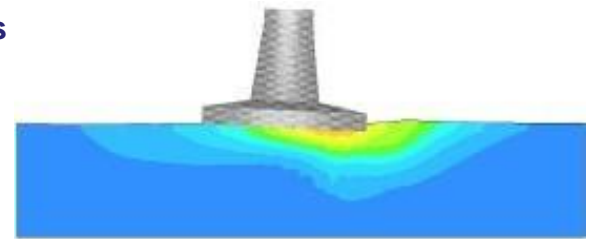
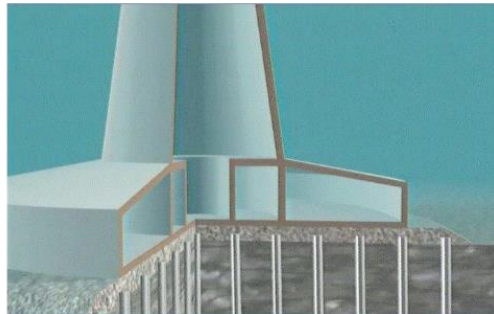
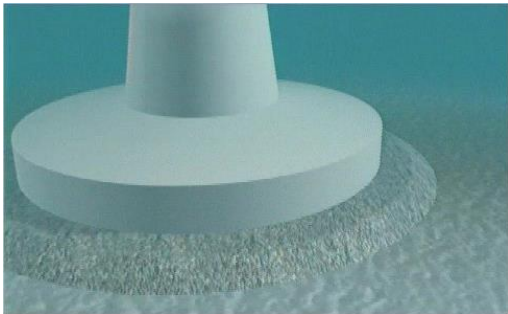
+ paire de haubans sacrificiels (séisme, foudre...)

QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATIONS OPÉRATIONNELLES DU CONCEPT DE ROBUSTESSE

Le principe de dimensionnement en capacité utilisé en conception parasismique – Exemple du pont de Rion-Antirion en Grèce

- [Le pont de Rion-Antirion](#) (Source : Vinci construction)

➔ Conception basée sur un certain nombre de systèmes fusibles



Fondations superficielles sur lit de gravier et sol renforcé :

- suppression du risque de liquéfaction
- écrêtage des efforts sismiques
- dissipation d'énergie par friction



Source : Univ. Gustave Eiffel
Nantes

QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATIONS OPÉRATIONNELLES DU CONCEPT DE ROBUSTESSE

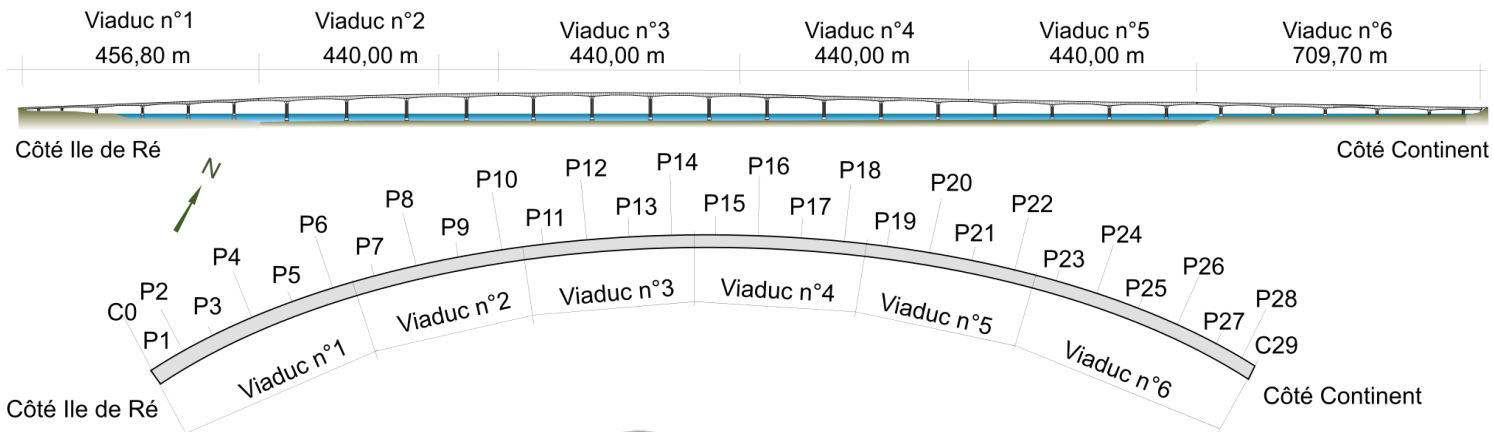
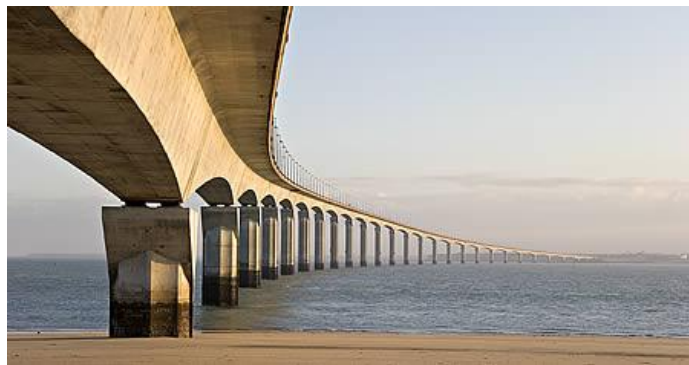
Le pont de l'Île de Ré

(Source : Wikipédia)



6 viaducs indépendants. Rupture d'un câble de précontrainte constatée sur le viaduc n°2 lors d'une visite de contrôle ordinaire le 12 sept. 2018 (malfaçon de chantier : mousse polyuréthane au lieu de coulis de ciment)

➔ Pas de dégât sur la structure mais mise en place de mesures importantes de restriction de la circulation (circulation interdite aux plus de 40 tonnes, distance de sécurité de 200 m entre véhicules de plus de 3,5 tonnes, vitesse maximale ramenée à 50 km/h) + surveillance renforcée (inspections quotidiennes) jusqu'au remplacement du câble défectueux



QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATIONS OPÉRATIONNELLES DU CONCEPT DE ROBUSTESSE

Le nouveau pont sur la rivière Saint-Etienne à la Réunion

(Source : Région Réunion et Cerema)

- Contexte

26 février 2007 : passage du cyclone Gamède sur l'île de la Réunion et effondrement du pont aval sur la rivière St-Étienne

(long. 520m, 2 voies de circulation sens St-Louis - St-Pierre, 27 000 véh./jour, liaison stratégique N-S de l'île)



- ➔ Réalisation en urgence d'un radier provisoire (partiellement détruit en février 2009 – cyclone Gael)
- OA amont passé à double sens
- 1 heure d'embouteillage continu pour effectuer 6 km et perturbations ressenties pendant 1 semaine
- Coût des travaux de réparation du radier provisoire : environ 250 000 €



- ➔ **Conclusions de la mission d'expertise Sétra / CETE Méd. sur les causes de l'effondrement :**

- Affouillement de la pile P4
- **Manque de robustesse de l'ouvrage** (effet « domino » sur les 13 travées !)

QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATIONS OPÉRATIONNELLES DU CONCEPT DE ROBUSTESSE

Le nouveau pont sur la rivière Saint-Etienne à la Réunion

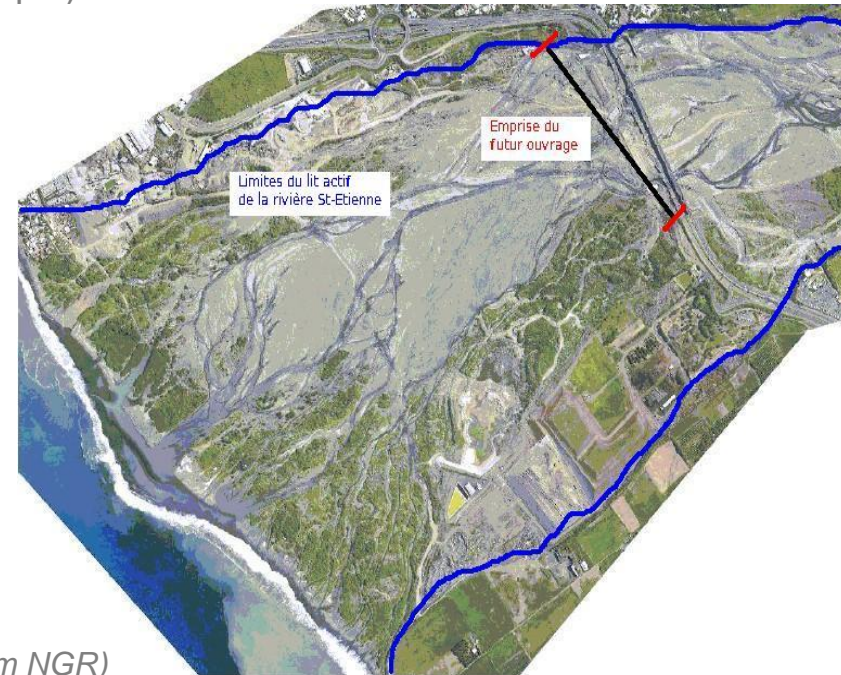
(Source : Région Réunion et Cerema)

- La conception du nouvel ouvrage
 - Niveau d'aléa pris en compte vis-à-vis des crues cycloniques (affouillement et poussée hydrodynamique)



Photos prises le 28/02/2007-DDE/SGT/CDOA

- 6 m de hauteur d'eau à 12 m/s (soit 43 km/h)
- Abaissement du lit pouvant atteindre 5 m / évènement
- Abaissement total jusqu'à 16 m NGR
- Affouillement local jusqu'à 3 m NGR (terrain actuel entre 23 et 38 m NGR)

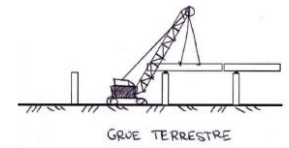
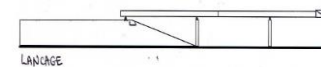
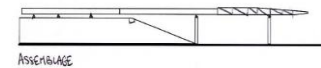
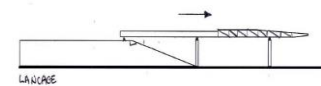
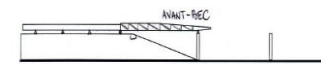
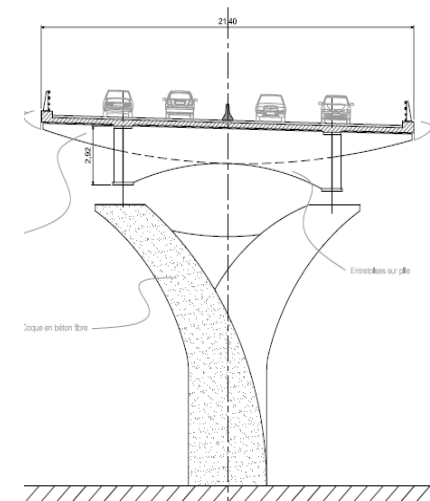
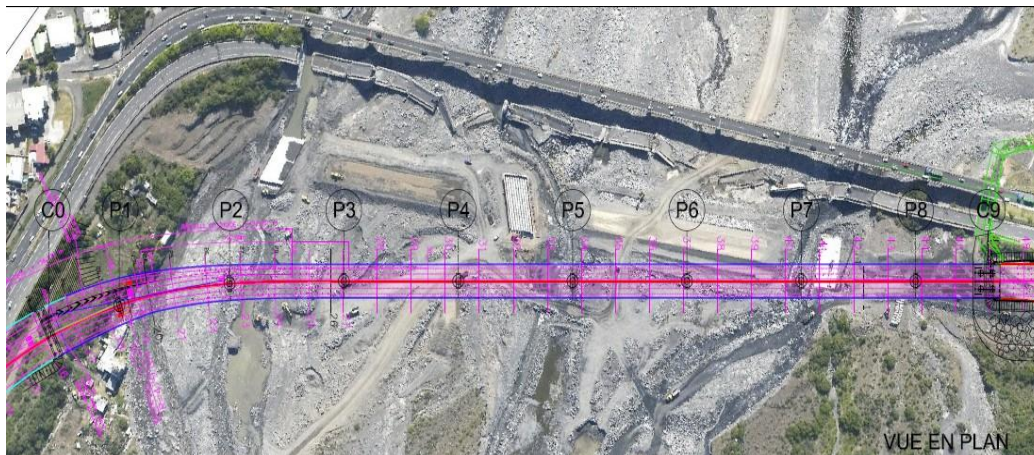


QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATIONS OPÉRATIONNELLES DU CONCEPT DE ROBUSTESSE

Le nouveau pont sur la rivière Saint-Etienne à la Réunion

(Source : Région Réunion et Cerema)

- La conception du nouvel ouvrage
 - Choix de structure et implantation

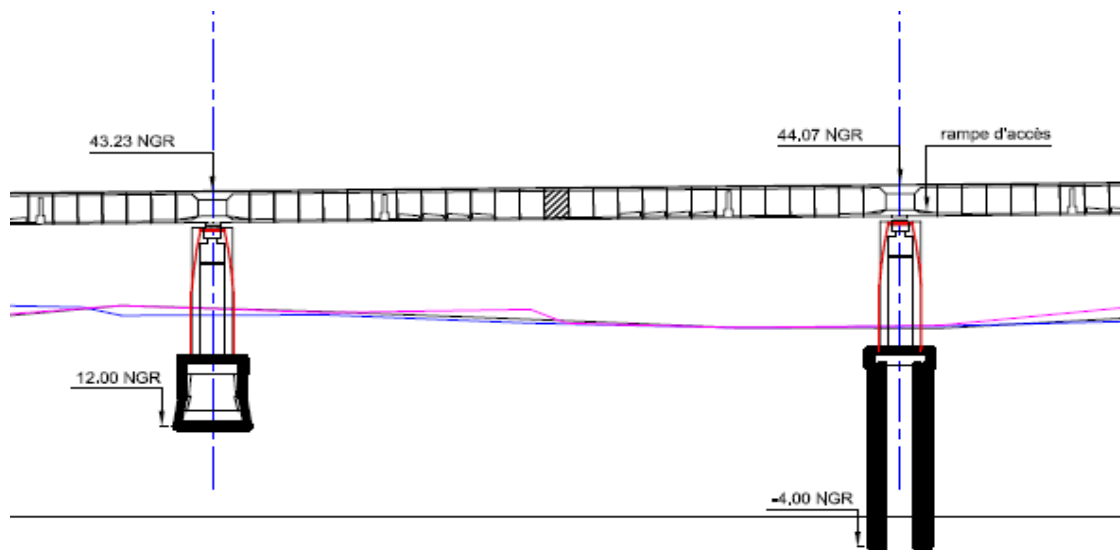


QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATIONS OPÉRATIONNELLES DU CONCEPT DE ROBUSTESSE

Le nouveau pont sur la rivière Saint-Etienne à la Réunion

(Source : Région Réunion et Cerema)

- La conception du nouvel ouvrage
 - Le système de fondations
 - Puits marocains à 12 m NGR sur coulée boueuse (P1-P4)
 - Enceintes octogonales de paroi moulée à -4m NGR sur alluvions (P5-P8)

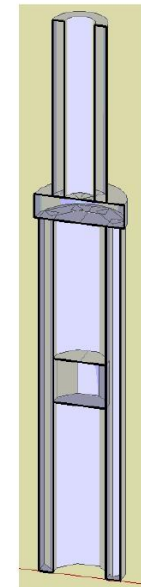
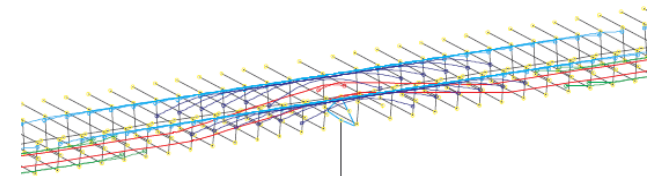
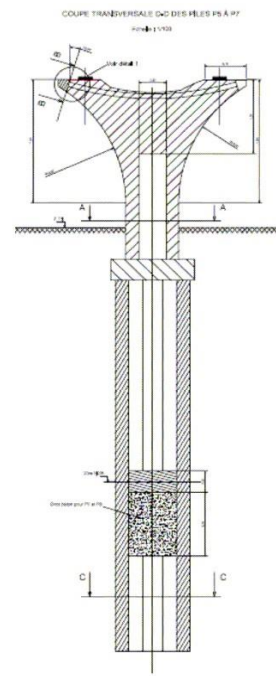
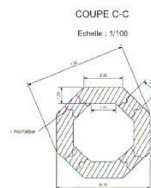
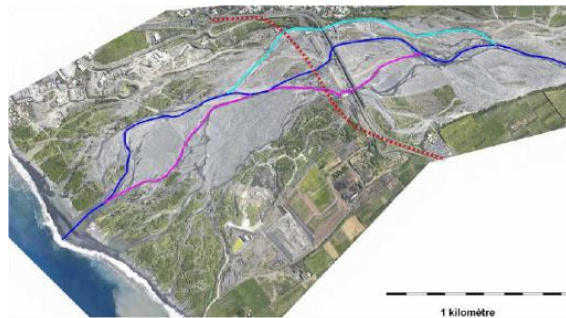


QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATIONS OPÉRATIONNELLES DU CONCEPT DE ROBUSTESSE

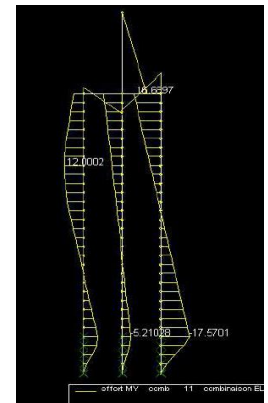
Le nouveau pont sur la rivière Saint-Etienne à la Réunion

(Source : Région Réunion et Cerema)

- La conception du nouvel ouvrage
 - Le système de fondations
- Forme quasi-circulaire insensible à la variabilité de l'orientation des lits
- Calculs réalisés pour configurations actuelle et lit affouillé



Rappel des principes de robustesse



QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATIONS OPÉRATIONNELLES DU PRINCIPE DE ROBUSTESSE

Le nouveau pont sur la rivière Saint-Etienne à la Réunion

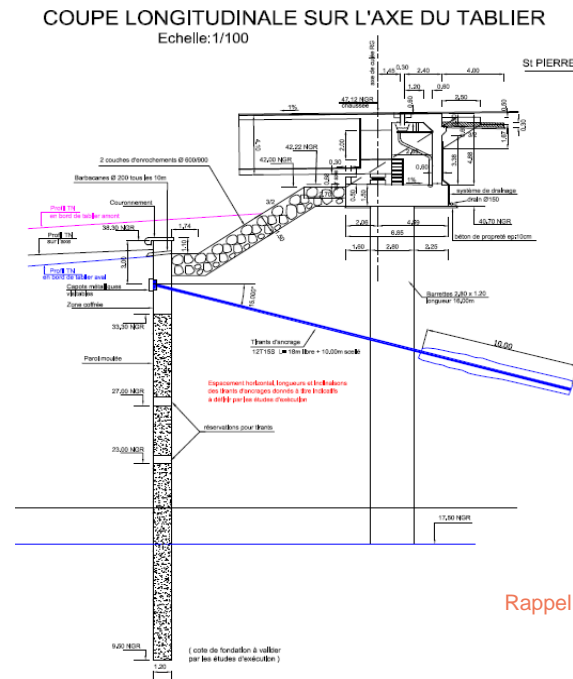
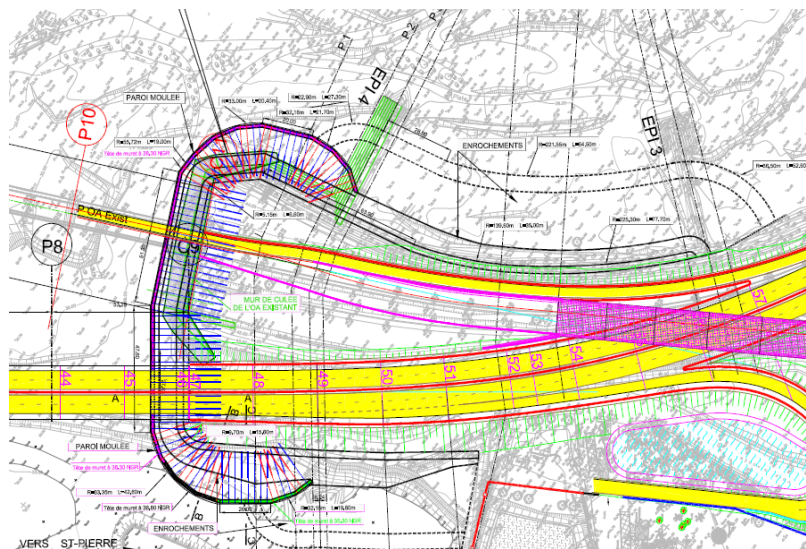
(Source : Région Réunion et Cerema)

- La conception du nouvel ouvrage
 - La protection de berges en rive gauche

Choix entre :

- Protection limitée à la culée nouvelle (remblai d'accès fusible)
- Protection étendue à l'ensemble de la zone (yc culée existante)

Option la + robuste privilégiée par le M.Ouvr.



QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATIONS OPÉRATIONNELLES DU CONCEPT DE ROBUSTESSE

Le nouveau pont sur la rivière Saint-Etienne à la Réunion

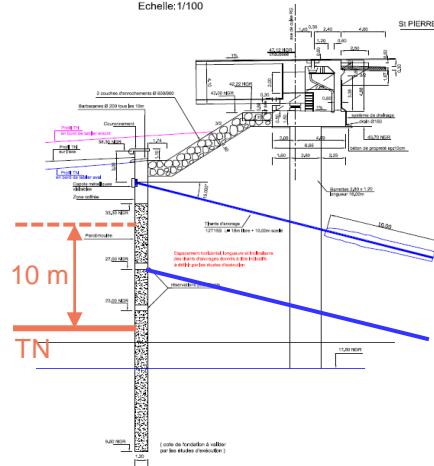
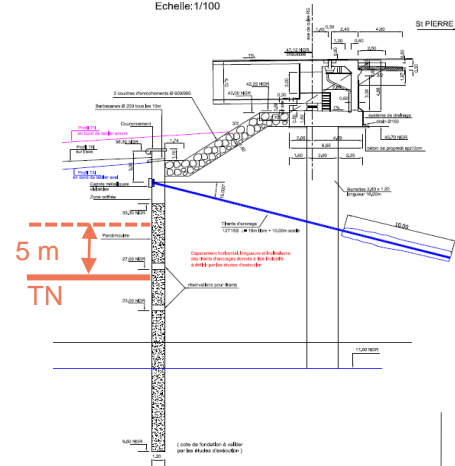
(Source : Région Réunion et Cerema)

- La conception du nouvel ouvrage
 - La protection de berges en rive gauche

Situations attendues (vérifications ELS)

COUPE LONGITUDINALE SUR L'AXE DU TABLIER
Echelle: 1/100

COUPE LONGITUDINALE SUR L'AXE DU TABLIER
Echelle: 1/100



1 seul lit de tirants
(mise en service)

1 évènement = abaiss. 5 m

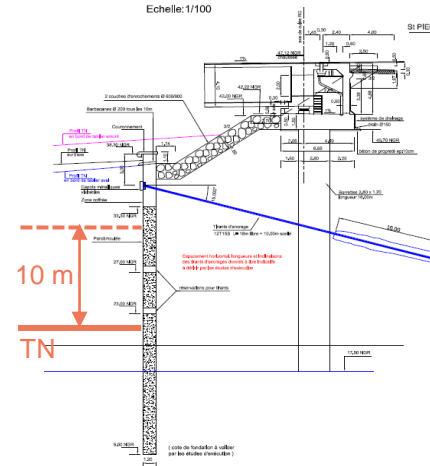
2 lits de tirants
(mise en service + tirants additionnels)

2 évènements = abaiss. 10 m

Situations de calcul / robustesse (vérifications ELU)

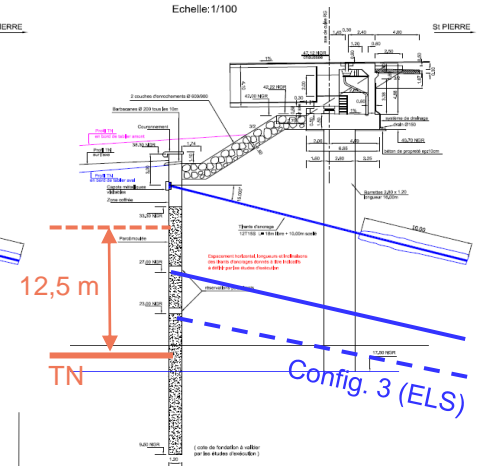
COUPE LONGITUDINALE SUR L'AXE DU TABLIER
Echelle: 1/100

COUPE LONGITUDINALE SUR L'AXE DU TABLIER
Echelle: 1/100



1 seul lit de tirants
(mise en service)

2 évènements = abaiss. 10 m



2 lits de tirants
(mise en service + tirants additionnels)

3 évènements = abaiss. 12,5 m

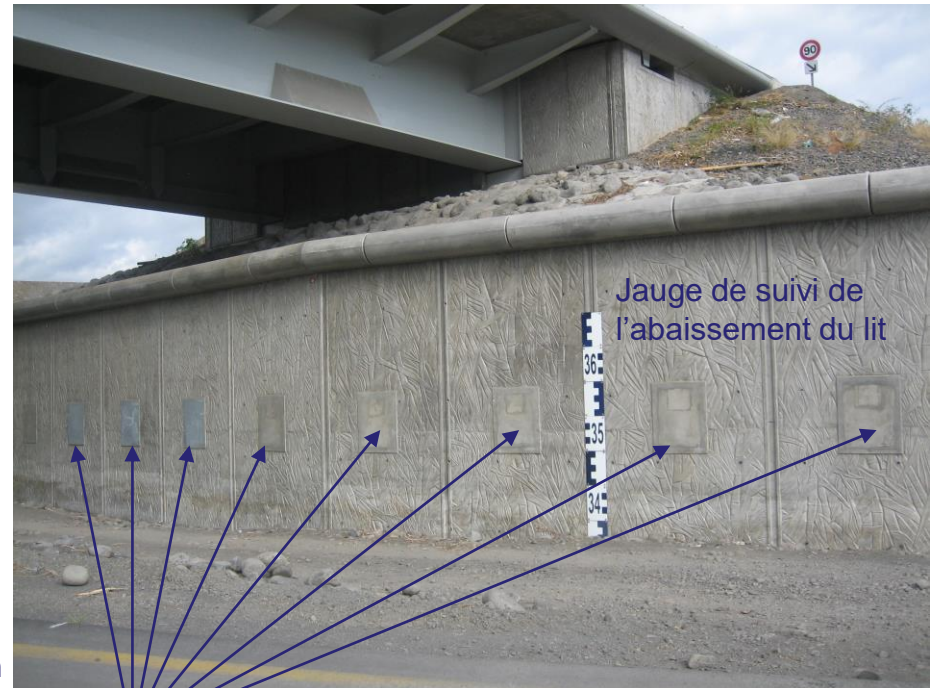
QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATIONS OPÉRATIONNELLES DU CONCEPT DE ROBUSTESSE

Le nouveau pont sur la rivière Saint-Etienne à la Réunion

(Source : Région Réunion et Cerema)



Surépaisseur sacrificielle de béton (protection contre chocs blocs charriés sur faces amont)



Jauge de suivi de l'abaissement du lit

Ancrages tirants (protection culée rive gauche)

Merci de votre attention

Denis Davi

Pôle « Réduction des risques sismiques et hydrauliques
appliquée aux Ouvrages d'Art »

Cerema Méditerranée

denis.davi@cerema.fr