

Journée technique

Gestion d'un patrimoine d'ouvrages terrestres

L'évaluation structurale

Benoît Poulin

Cerema / Direction territoriale Ouest

Sommaire

- Motivations de l'évaluation structurale
- Les évolutions historiques
- Le contexte réglementaire – les documents de référence
- Les méthodes d'évaluation structurale
- Les pratiques au sein du Ministère
- Documentation

Définition de l'évaluation structurale

- Appréciation de la performance d'un ouvrage vis-à-vis :
 - de la sécurité structurale (ou capacité portante) : assure la résistance de la structure aux actions prévues en situation normale (Etats limites ultimes)
 - de l'aptitude au service : assure le maintien de l'exploitation de la structure (Etats limites de service)
 - de la durabilité (matériau)

Motivations de l'évaluation structurale

- Découverte de désordres
 - Comprendre l'origine
 - Apprécier l'incidence
 - Évaluer la capacité portante résiduelle
- Prise en compte d'actions non prévues à la conception
 - Évolution / modifications des charges d'exploitation (convois exceptionnels, TCSP, ...)
 - Ajout / modification de fonctionnalités (Élargissement, DR plus performant, écran phonique, chocs sur pile, ...)
- Connaissance, « bilan de santé »
 - Examiner les conditions de fonctionnement (pour les ouvrages historiques, grands ouvrages....)

Évolution des règlements

- Empirisme jusqu'au XIXe siècle
- 1850 : Naissance RdM
 - Calculs déterministes : contraintes admissibles

$$\sigma \leq \sigma_{\text{adm}} = \frac{\sigma_{\text{rupt}}}{K}$$

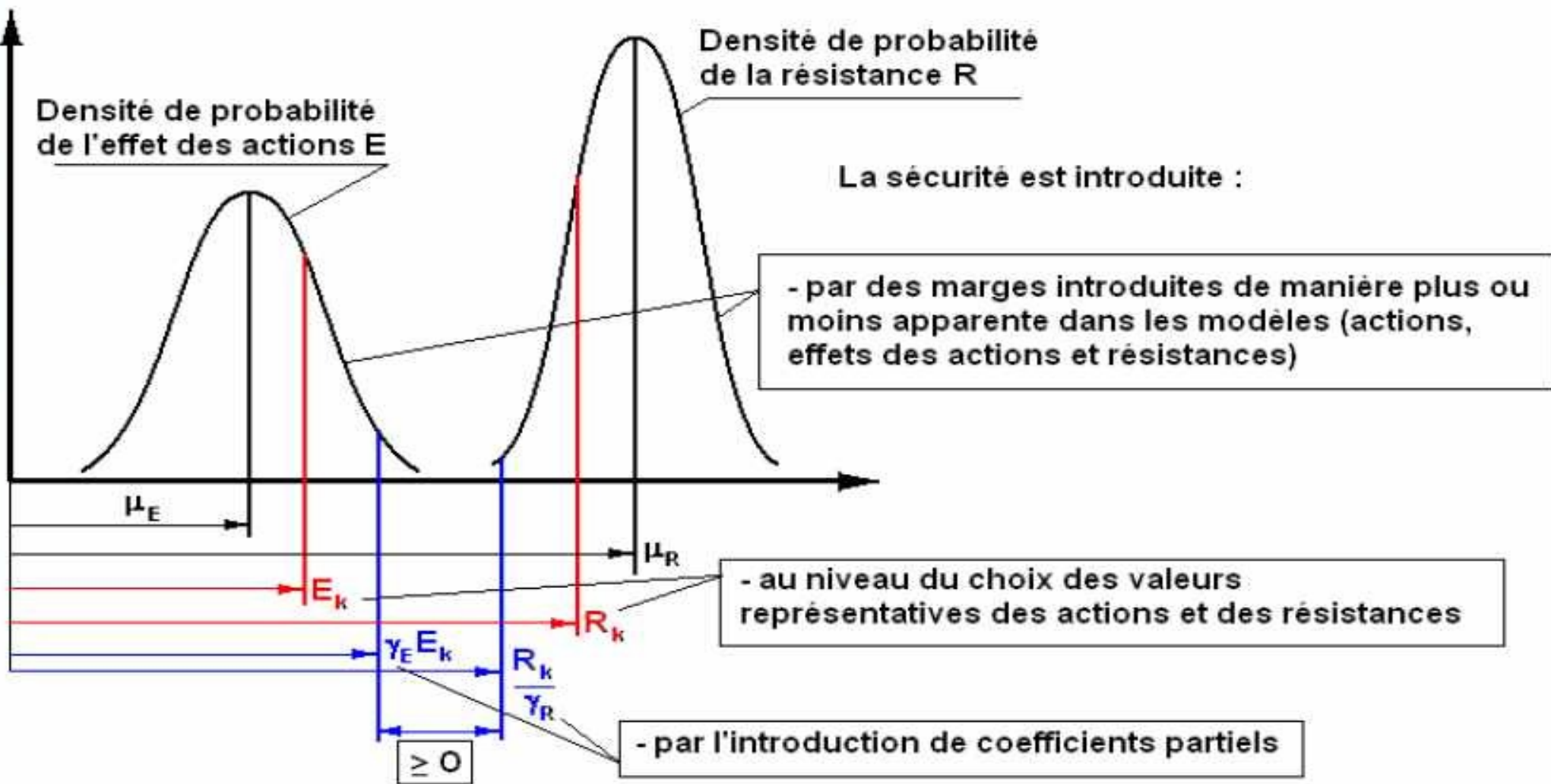
- Méthodes probabilistes

$$P_f = P(R < S) \leq P_{f0}$$

Les règlements modernes

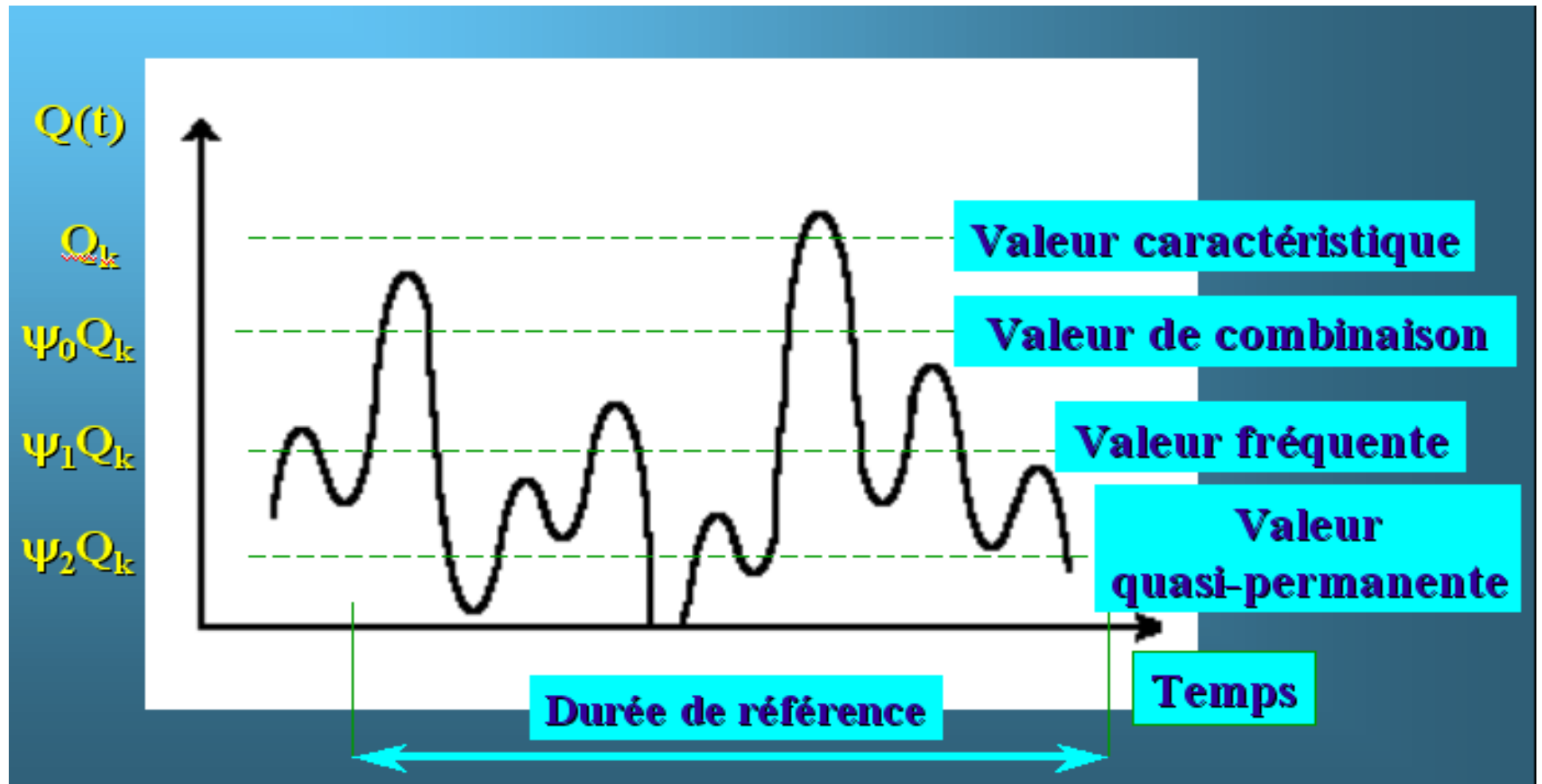
- L'approche semi-probabiliste
 - Règles forfaitaires (prêtes à l'emploi, pré calculées...)
 - Application de coefficients partiels de sécurité (décomposition en structure, matériaux, charges...)
 - Définition d'états limites

Les règlements modernes

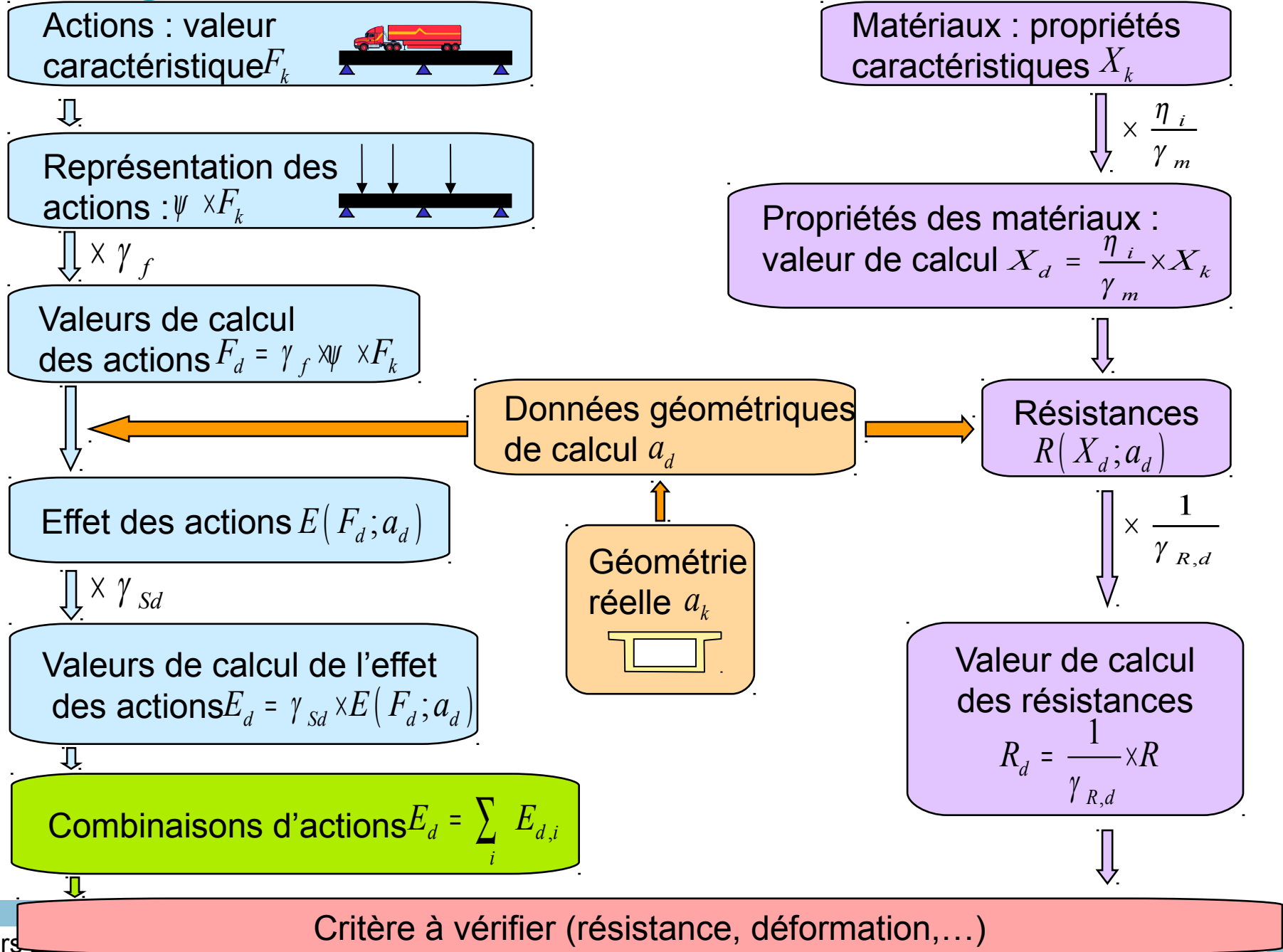


Les règlements modernes

Actions combinées entre elles pour obtenir des valeurs représentatives

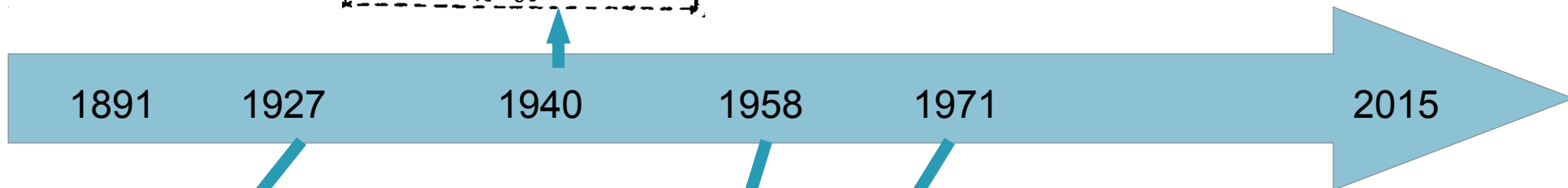
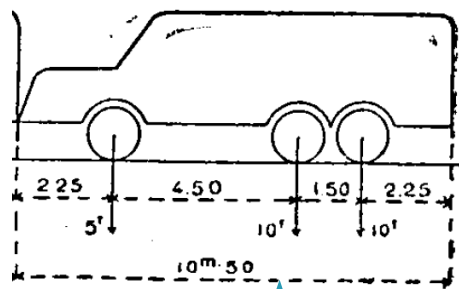
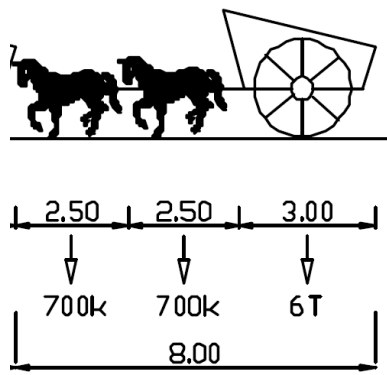


Les règlements modernes

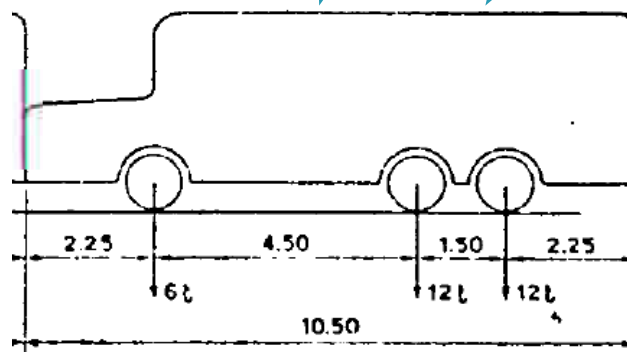
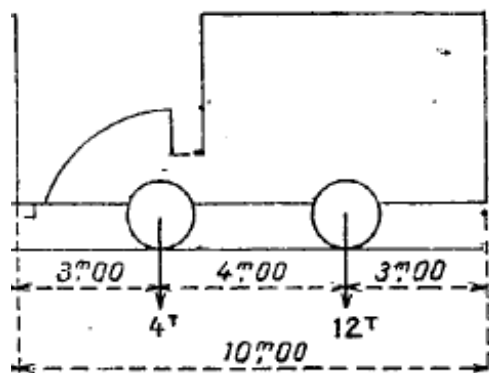


Évolution des charges

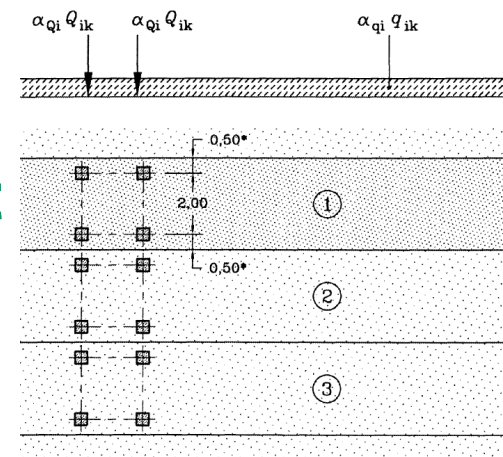
des charges de plus en plus lourdes



16 t

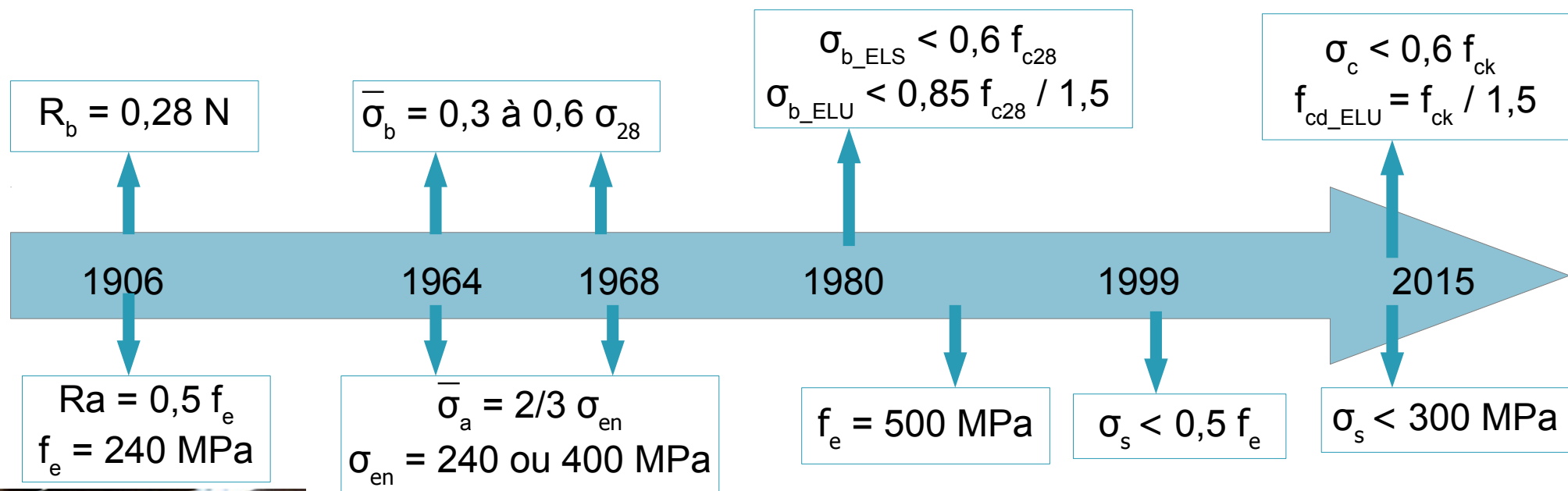


60 t



Évolution du béton armé

des bétons plus performants, des aciers plus durs, plastification des sections, fissuration, fatigue

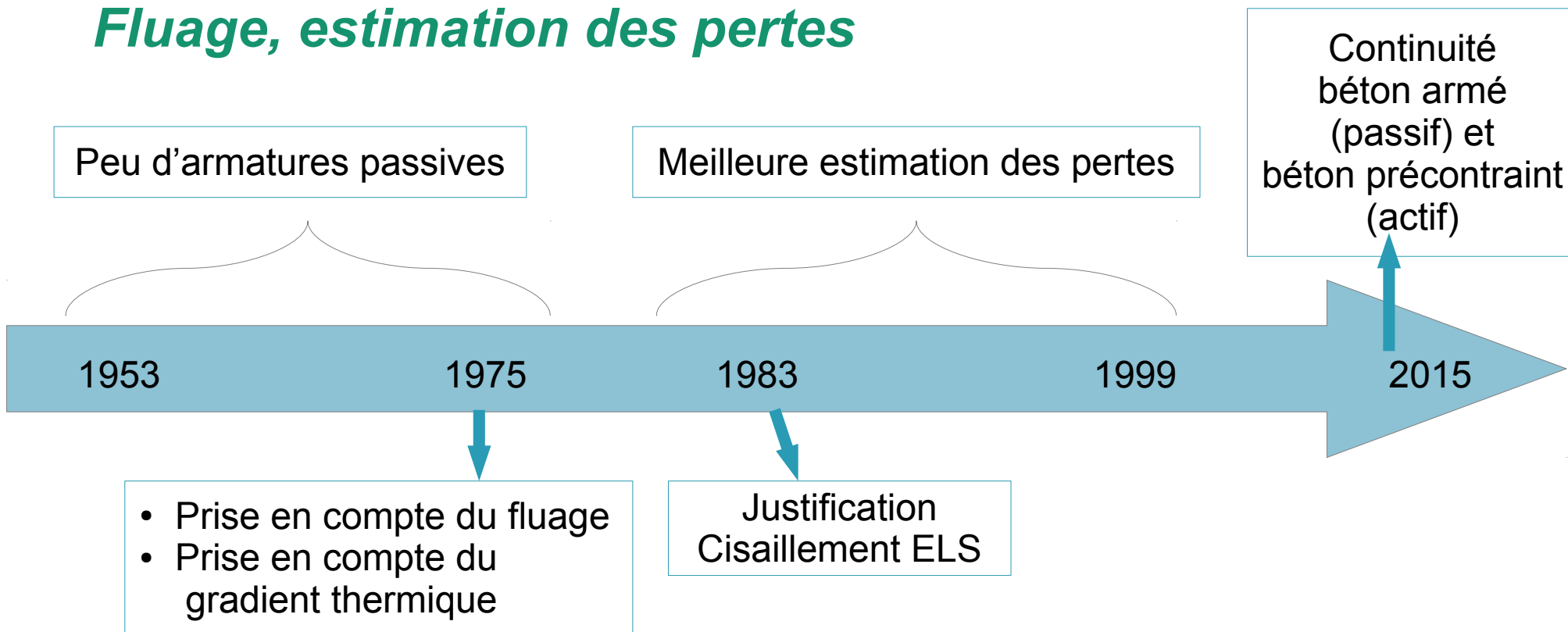


aciers Caron et Tor 1961

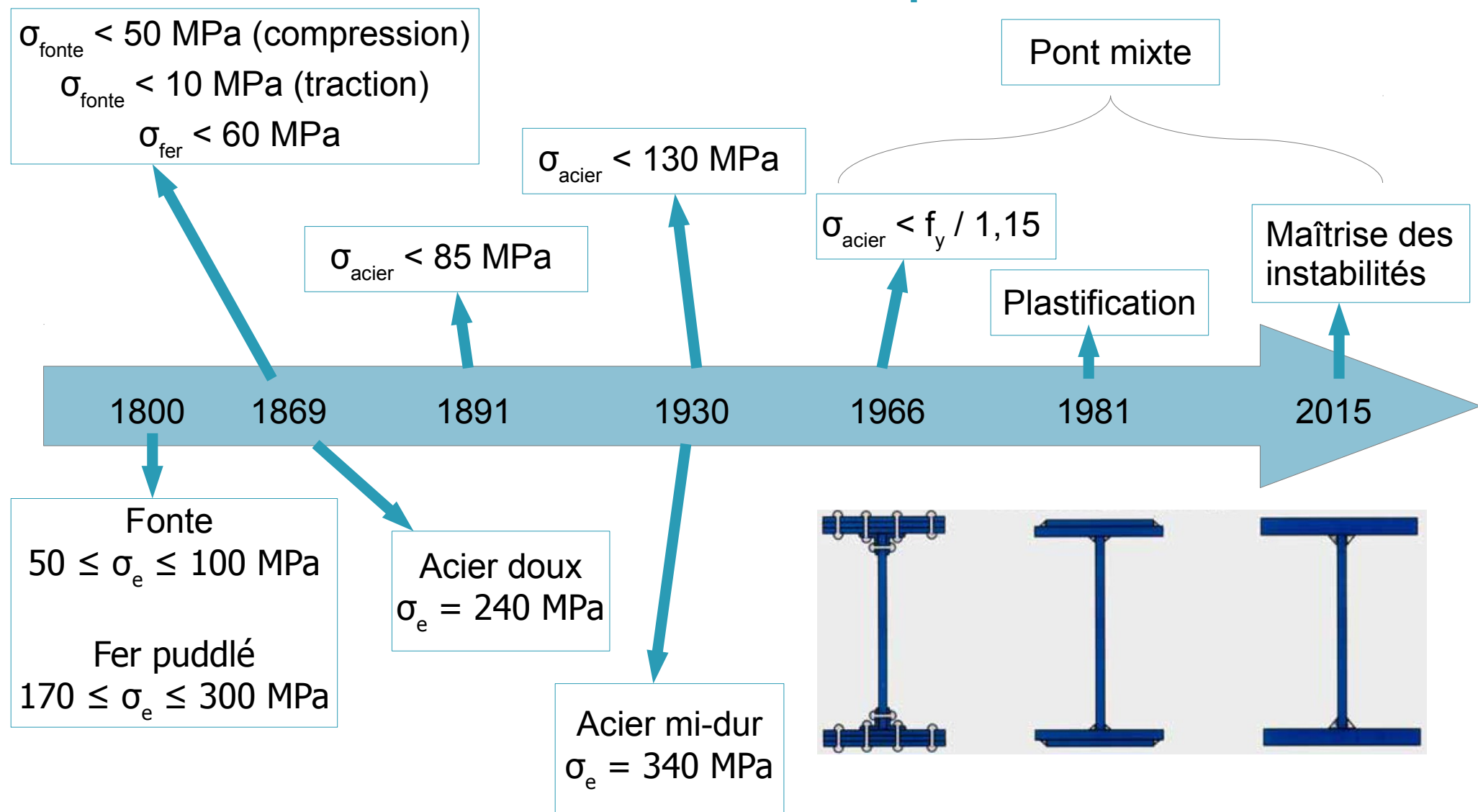
- N : résistance à la compression du béton sur cube à 90 jours
- σ_{28} : résistance à la compression nominale (éprouvettes 16x32) à 28 jours
- f_{c28} / f_{ck} : résistance caractéristique à la compression du béton à 28 jours
- $f_e / \sigma_{en} / f_{yk}$: limite élastique en traction des aciers passifs

Évolution du béton précontraint

*Gradient thermique, prise en compte de la fragilité,
Fluage, estimation des pertes*



Évolution de l'acier de charpente



Le contexte réglementaire – place des eurocodes

Les Eurocodes rassemblent les progrès scientifiques et l'expérience passée

Mais, en général, ils ne concernent que les ouvrages neufs

Exemple de l'Eurocode 1-2 « Actions sur les structures – Actions sur les ponts dues au trafic »

Section 1 – Généralités : Paragraphe 1.1 Domaine d'application
*« (2) Les charges d'exploitation définies dans l'EN 1991-2 sont destinées à être utilisées pour le calcul des **ponts neufs**, piles, culées, murs garde-grève, murs en ailes et en retour, etc., ainsi que de leurs fondations »*

Le contexte réglementaire – place des eurocodes

Deux exceptions : Eurocodes 0 et 8

- Eurocode 0 – Eurocodes structuraux – Bases de calcul des structures

Paragraphe 1.1 – Domaine d'application

« (4) *L'EN 1990 est applicable pour l'évaluation structurale de **constructions existantes**, en vue de projeter des réparations et des modifications ou d'étudier des changements d'utilisation. NOTE : des dispositions additionnelles ou modifiées pourront se révéler nécessaires selon le cas. »*

- Eurocode 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes

Partie 3 : **évaluation et renforcement** des bâtiments »

Le contexte réglementaire – place des eurocodes

CEN/TC 250 - Eurocodes structuraux

Général Structure Programme de Travail Normes publiées

CEN/TC 250 Domaine d'application

Normalisation des règles de conception et de dimensionnement des structures de bâtiment et du génie civil en tenant compte des relations entre les règles de conception et de dimensionnement et les hypothèses faites concernant les matériaux, la mise en oeuvre et le contrôle.

Officers

Chairperson	Mr Steve Denton
Secretary	Mrs Tracey Wilkins
CCMC Contact Point	Mr Gonçalo Ascensão

Eurocode en cours de rédaction sur l'évaluation et la rénovation des structures existantes

« **ASSESSMENT AND RETROFITTING OF EXISTING STRUCTURES** »

Working group	Title
CEN/TC 250/WG 1	Policy, procedures and links with other standards
CEN/TC 250/WG 2	Assessment and Retrofitting of Existing Structures

Le contexte réglementaire

Norme ISO 13822:2010

« Bases du calcul des constructions – Evaluation des constructions existantes »

Introduction

« *The ultimate goal is to limit construction intervention to a strict minimum, a goal that is clearly in agreement with the principles of sustainable development.* »

→ **limiter les interventions sur les structures**

Les documents de référence

- Rapport final du projet européen BRIME
« **BR**idge **M**anagement in **E**urope »

<http://www.transport-research.info/Upload/Documents/200310/brimerep.pdf>



Auteurs : Sétra
RST

mai 2012



Méthodes courantes d'évaluation structurale des ouvrages existants

Pratiques en vigueur dans le réseau scientifique et technique (RST)

Ouvrages
d'Art

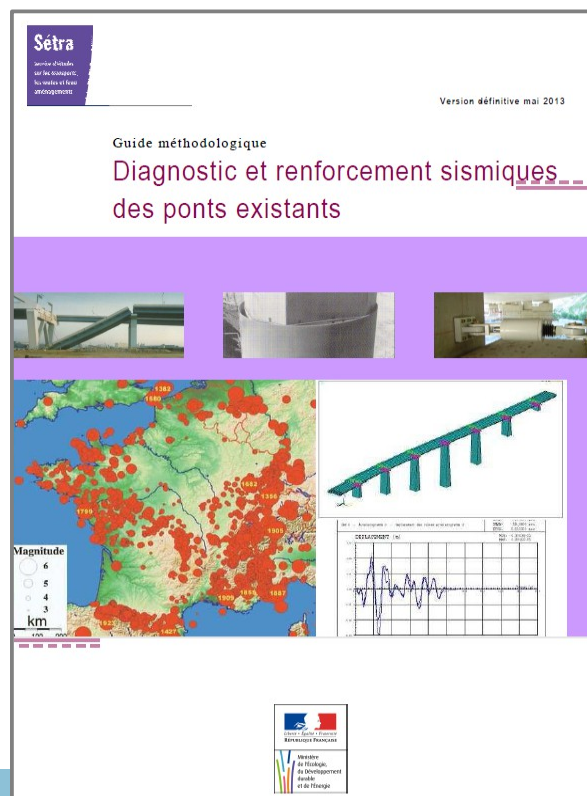
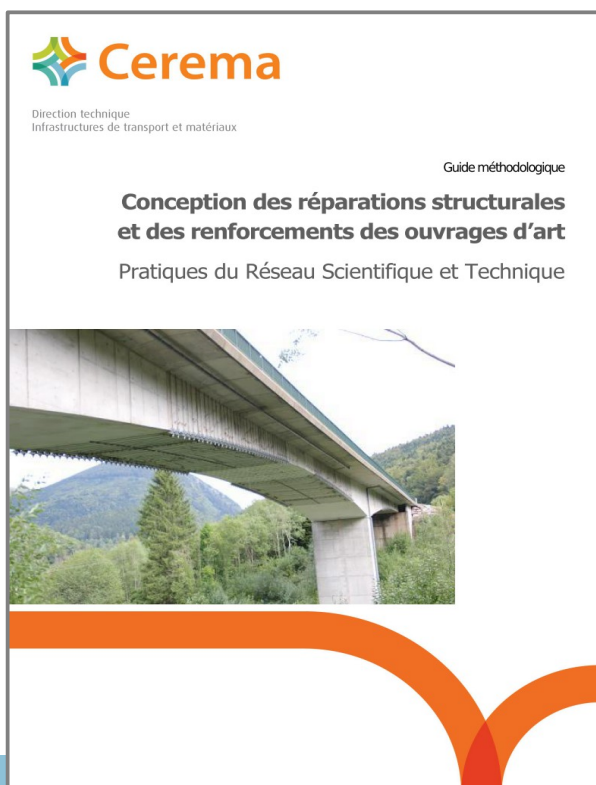
35

http://www.piles.setra.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/n35_cle0b6f4e.pdf

Les documents de référence

Guides du Cerema à paraître

- Conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art
- Diagnostic et renforcement sismique des ponts existants



4 mars 2015
Rennes (35)

Gestion d'un patrimoine d'ouvrages terrestres
L'évaluation structurale

Les méthodes courantes d'évaluation structurale des ouvrages existants (hors TE)

➤ Niveau 0 : évaluation sans recalcul

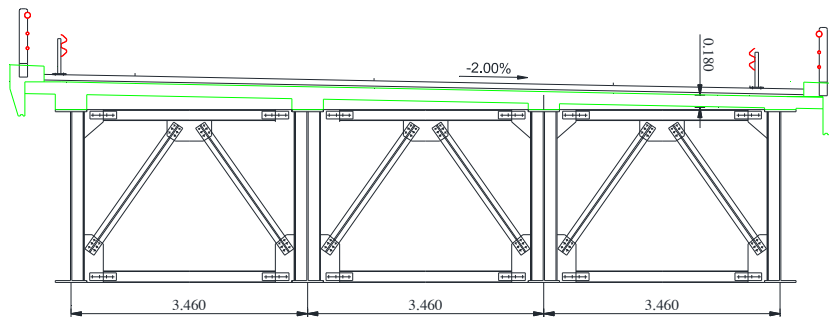
Pourquoi s'inquiéter pour un ouvrage robuste en bon état ?



Les méthodes courantes d'évaluation structurale des ouvrages existants (hors TE)

➤ Méthodes courantes de recalcul de niveau 1 : évaluation avec recalcul, le fait que l'ouvrage est déjà construit n'étant pas ou peu pris en compte

- Utilisation des règlements pour ouvrages neufs
- La méthode ne s'applique pas dans les cas d'ouvrages présentant des désordres structuraux



Ex : Fatigue non prise
en compte à l'origine

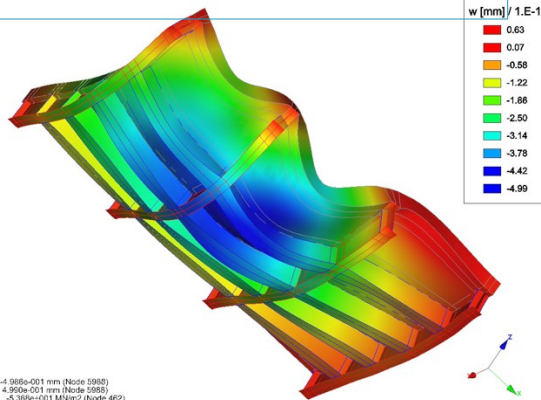


Les méthodes courantes d'évaluation structurale des ouvrages existants (hors TE)

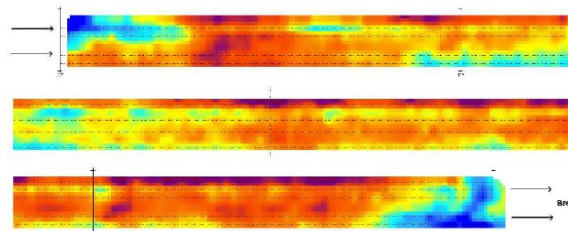
➤ Méthodes courantes de recalcul de niveau 2 : évaluation avec recalcul, le fait que l'ouvrage est déjà construit est pris en compte

- Utilisation des règlements pour ouvrages neufs avec adaptations sur les sollicitations et les résistances
- Recherche de réserves de capacité portante
- Prise en compte des résultats d'auscultation et d'instrumentation

Ex : Eléments finis



Investigations

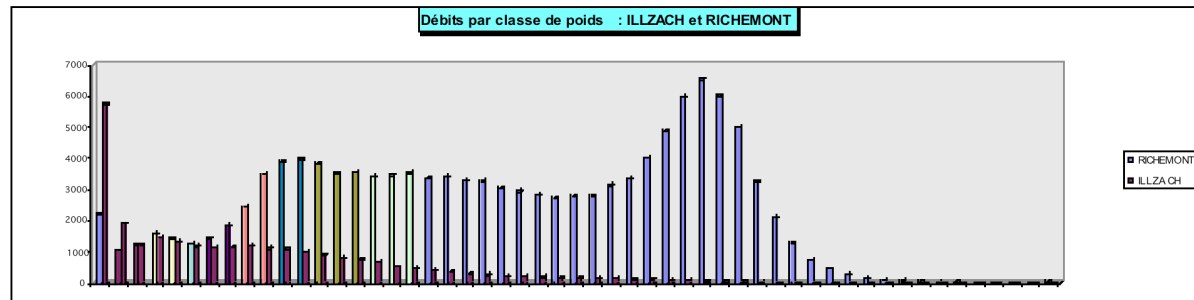


Les méthodes courantes d'évaluation structurale des ouvrages existants (hors TE)

➤ Méthodes avancées de recalcul : approche fiabiliste

- Probabilité sur les paramètres
- Simulation de trafic

COMPLIQUE....



- ...mais études en cours pour se ramener à des calculs semi-probabilistes
 - Rapport d'étude « Théorie de la fiabilité – Application à l'évaluation structurale des ouvrages d'art » - Février 2012
http://www.infra-transports-materiaux.cerema.fr/IMG/pdf/1206w_Rapport_Theorie_de_la_fiabilite.pdf
 - Bulletin OA n°67 : « Évaluation structurale des ouvrages existants par approche fiabiliste » - Mai 2012
http://www.setra.fr/html/boa/Data_Base_BOA/BOA_n67.html

Les pratiques au sein du ministère

L'ouvrage évalué doit-il être conforme aux règlements pour ouvrages neufs ?

- En l'absence de textes réglementaires, la stricte application des règlements destinés aux ouvrages à construire pour évaluer un ouvrage existant n'est en général pas pertinente et **peut conduire à des renforcements ou réparations injustifiées (marges de sécurité injustifiées)**.
- Il n'est pas non plus possible de s'appuyer entièrement sur les règlements anciens qui n'intègrent pas les évolutions des connaissances scientifiques récentes (comportement des matériaux)
- Il convient de prendre en compte **l'état de l'ouvrage**

Les pratiques au sein du ministère

Les spécificités d'un ouvrage existant

La meilleure connaissance que l'on a des caractéristiques de l'ouvrage (géométrie, résistances des matériaux, dégradations...) ou du trafic supporté peut autoriser des aménagements des règlements pour ouvrages neufs **sans pour autant remettre en cause le niveau global de sécurité structurale**

Exemple : la réduction de l'incertitude sur certaines données justifie une réduction des coefficients partiels de sécurité pondérant les actions et les résistances

Les pratiques au sein du ministère

- Quels règlements de charge utiliser pour les évaluations structurales ?

L'Eurocode 1-2, règlement actuel, censé être le plus représentatif du trafic réel



Les pratiques au sein du ministère

➤ Prise en compte de l'ELS et de l'ELU

- **Le niveau d'aptitude au service (ELS) d'un ouvrage existant doit-il être le même que celui requis pour un ouvrage neuf ?**
 - *Le principe selon lequel un ouvrage existant peut avoir un niveau théorique d'aptitude au service (ELS) inférieur à celui requis pour un ouvrage neuf est généralement appliqué dans le Ministère (**hors TE**)*
- **Le niveau de sécurité structurale (ELU) d'un ouvrage existant doit-il être le même que celui requis pour un ouvrage neuf ?**
 - ***OUI**, en tenant compte éventuellement des aménagements justifiés par la meilleure connaissance que l'on a de l'ouvrage*
 - *Mais : un niveau de sécurité moindre peut être envisagé sur la base de critères socio-économiques et d'une analyse de risque et pour des durées d'usage réduites. Elle est compensée en général par une mise de l'ouvrage sous surveillance renforcée*

Les pratiques au sein du ministère

➤ Quels aménagements prendre en compte ?

– Modifications de coefficients partiels à l'ELU

Le coefficient partiel sur les charges permanentes γ_G est de 1,35. Il est le produit de deux coefficients γ_{Sd} et γ_g :

- γ_{Sd} correspond aux incertitudes de modélisation = 1,125
- γ_g (1,2) correspond à l'incertitude sur la valeur de G. Cette valeur peut être réduite sur la base de résultats d'investigations sur l'ouvrage

Au total, il convient de ne pas descendre en dessous de $\gamma_G = 1,2$

Les pratiques au sein du ministère

➤ Quels aménagements prendre en compte ?

– Modifications de coefficients partiels à l'ELU

- Les coefficients partiels relatifs aux charges routières ne doivent pas être modifiés.
- Les coefficients partiels relatifs aux matériaux peuvent être affinés en fonction des **résultats de mesures** effectuées (et de leur **dispersion**) (cf. NF EN 1992-1-1 Annexe A)

– Prise en compte de valeurs mesurées sur l'ouvrage

Masse volumique, épaisseur enrobé, relevé géométrique, caractéristiques mécanique béton / acier, trafic réel, ...

Les pratiques au sein du ministère

➤ Quelles caractéristiques mécaniques des matériaux en bon état ?

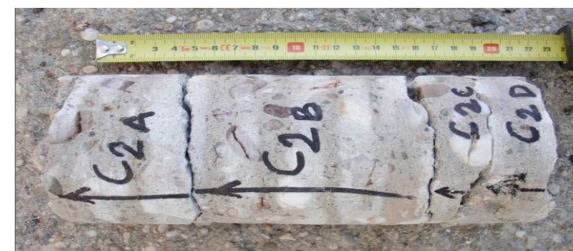
– Ouvrages postérieurs à 1960

Pour ces ouvrages, il est en général possible de baser le recalcul sur les résistances des matériaux (béton et acier) visées dans les documents d'exécution

– Ouvrages antérieurs aux années 1960

Pour ces ouvrages, et en particulier pour ceux construits juste après la seconde guerre mondiale avec des matériaux de récupération, il convient en général de procéder à des mesures des caractéristiques des matériaux de l'ouvrage

!!!
OUVRAGE
DEGRADE
!!!



Les pratiques au sein du ministère

➤ Quels caractéristiques mécaniques des matériaux présentant des désordres ?

Les principes précédents ne sont plus applicables aux cas des matériaux présentant des désordres

Grande prudence : difficile d'énoncer des règles générales, chaque cas est particulier

- Effet de la corrosion des armatures
 - Réduction de la section résistante
 - Réduction du palier plastique avant rupture
 - Réduction de l'adhérence
 - Réduction de la résistance à la fatigue

Vérifier les sections à l'ELU en retenant la section résiduelle non corrodée et selon une hypothèse de comportement élastique

- Effet de la corrosion des armatures actives

Vérifier la susceptibilité à la corrosion fissurante sous tension, laquelle peut conduire à une rupture brutale par propagation d'une fissure

Les pratiques au sein du ministère

➤ **Comment trouver des réserves de capacité portante ?**

- **En retenant des taux de travail pour les matériaux plus importants que lors de la conception**

Ex : les valeurs des contraintes limites des anciennes règles de calcul étaient en général plus faibles qu'aujourd'hui

- **En réalisant des modélisations plus fines faisant mieux participer la matière**

Ex : modèles à grilles de poutres ou aux éléments finis

- **En retenant des méthodes de justification plus évoluées**

Ex : contrôle du déversement à l'aide d'un calcul au 2^e ordre à la place de la méthode forfaitaire

- **En faisant participer des éléments généralement négligés**

Ex : prise en compte de la longrine de la barrière de sécurité qui rigidifie la structure

Documentation

Documents disponibles sur le site **PILES**

<http://www.piles.setra.developpement-durable.gouv.fr/>

Dossier thématique « Ingénierie des ouvrages existants »

→ **Documents anciens sur les ouvrages d'art**

- Textes sur les règlements de calculs et de charges depuis 1852
 - Textes réglementaires
 - Autres textes
 - Documents de synthèse
- Textes sur la précontrainte
 - Agréments des armatures de précontrainte
 - Agréments des procédés de précontrainte
 - Autorisation de distribution
 - Autres textes
 - Documents de synthèse

Documentation

Documents disponibles sur le site **PILES**

<http://www.piles.setra.developpement-durable.gouv.fr/>

Dossier thématique « Ingénierie des ouvrages existants »

→ Documents anciens sur les ouvrages d'art

– Textes sur les aciers de construction métallique

- Catalogues des anciens profilés métalliques
- Autres textes
- Documents de synthèse

– Textes sur les armatures de béton armé

- Agréments et homologations
- Autres textes
- Documents de synthèse

Merci de votre attention

- Pour en savoir plus :

http://www.piles.setra.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/n35_cle0b6f4e.pdf

http://www.piles.setra.developpement-durable.gouv.fr/IMG/ods/Reglements_de_calculs_et_de_charges_cle21e36b-1.ods

http://www.piles.setra.developpement-durable.gouv.fr/IMG/ods/Liste_des_textes_cle1167a6-1.ods

http://www.piles.setra.developpement-durable.gouv.fr/IMG/ods/Liste_des_textes_cle1167a6.ods

http://www.piles.setra.developpement-durable.gouv.fr/IMG/ods/liste_des_textes_cle13b198.ods