Introduction

(CIV8530 - Fiabilité des structures et systèmes)

Enseignant: James-A. Goulet

Département des génies civil, géologique et des mines
Polytechnique Montréal

Chapitre 1 - O. Ditlevsen, and H. O. Madsen, (1996),
Structural reliability methods. J. Wiley & Sons, New York, NY

Plan du module #0

Introduction

Risque

Plan de cours

Sujets couverts

Organisation de la matière

Théorie probabilité
- 0 Révision algèbre & probabilités
- 1 Lois de probabilités
- 3 PDF multivariés

Fiabilité des structures & systèmes
- Introduction
- 2 Formulation fiabilité composantes
- 9 Formulation fiabilité systèmes

Estimation – p_f échantilonnage
- 4 Monte Carlo
- 12 Échantillonnage par importance

Estimation – p_f analytique
- 5 FOSM
- 6 FORM
- 8 SORM

Utilisation des résultats
- 7 Analyse de sensibilité
- 10 Incertitudes aléatoires & épistémiques
- 11 Données empiriques
- 13 Prise de décision
- 14 Métamodèles & modèles empiriques

Plan de la section

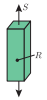
Introduction

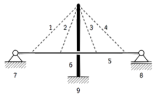
1.1 Concepts de base associés à la fiabilité

1.2 Piège commun

1.3 Fiabilité, pourquoi?

Terminologie

Composante: Élément considéré comme indivisible 

Système: Assemblage de composantes 

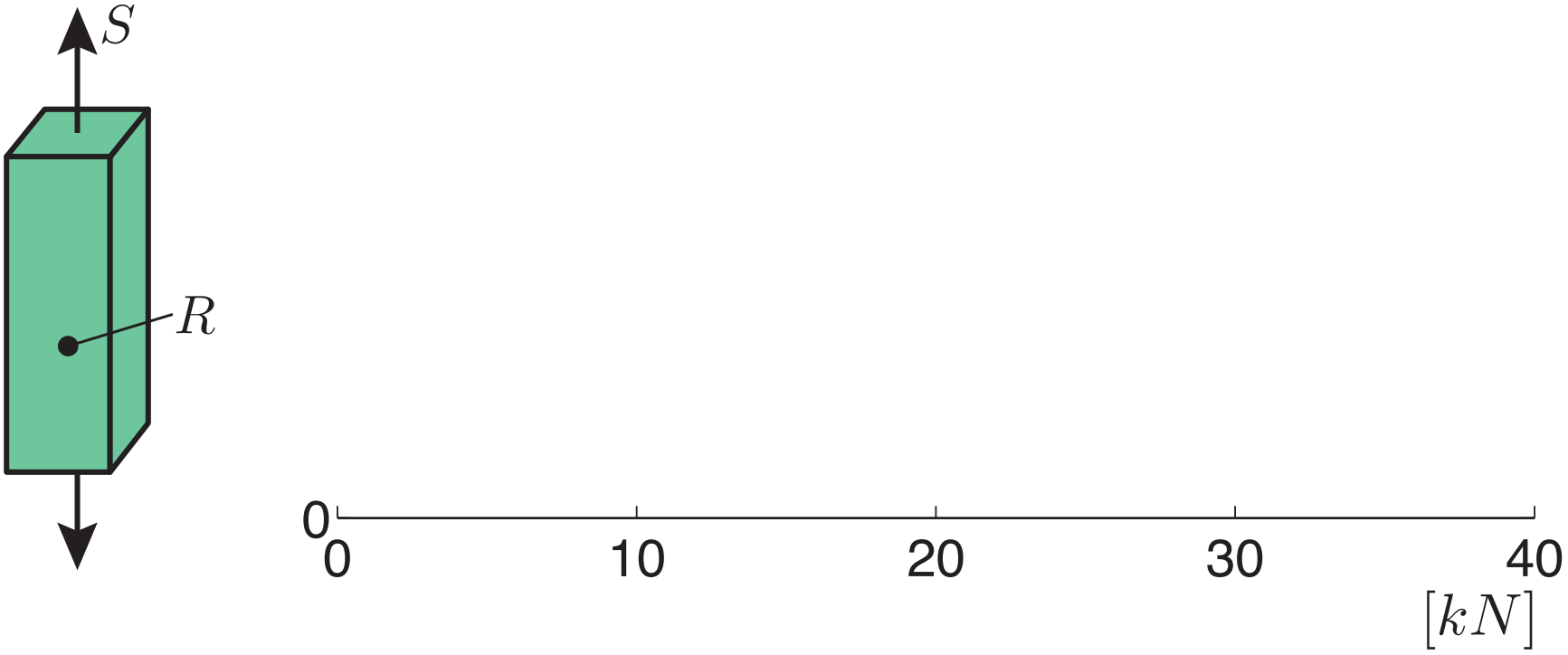
État d'un système: {Survie, Défaillance}

Défaillance: Domaine où le système ne remplit plus ses fonctions

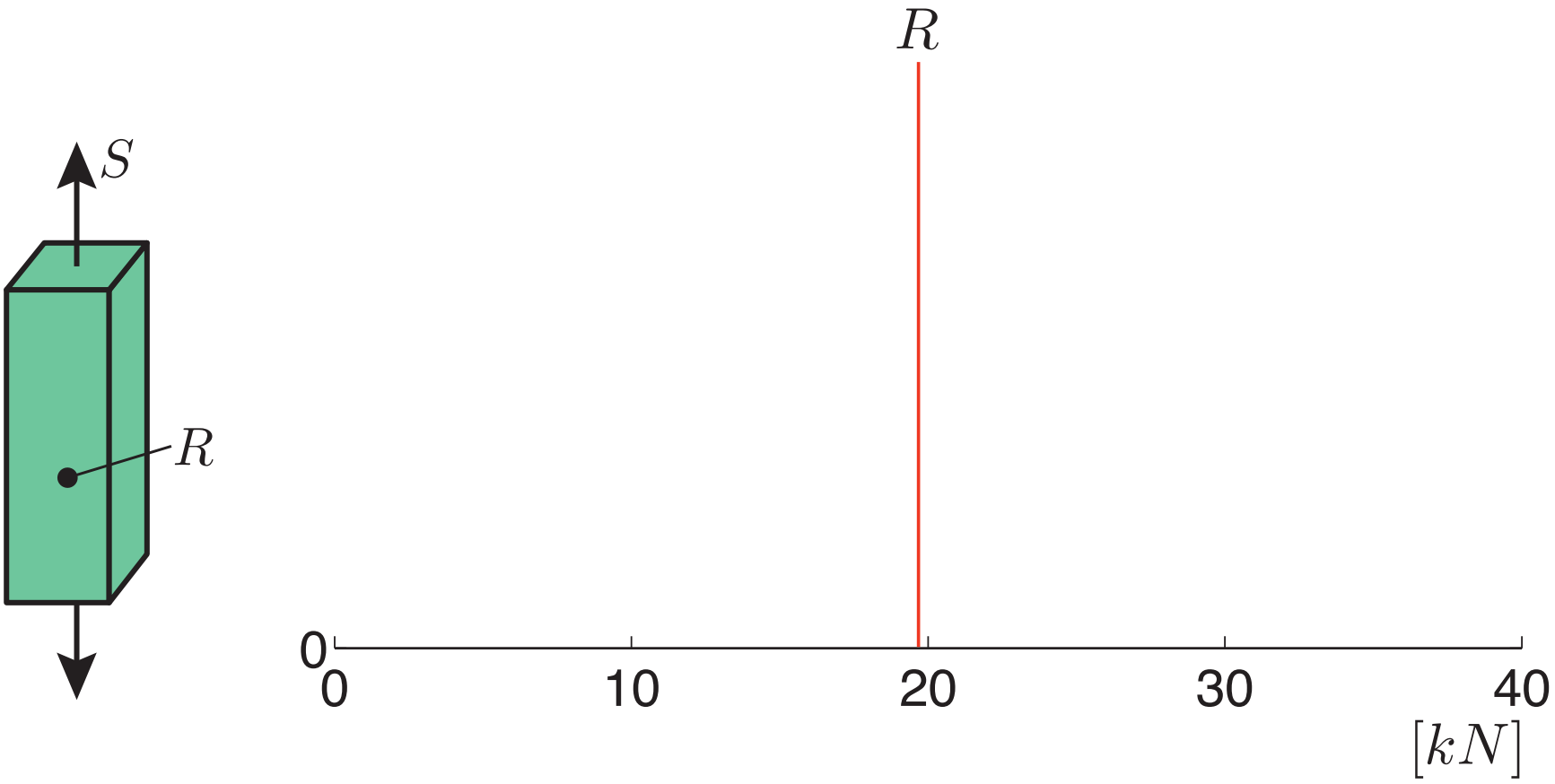
Fiabilité: Probabilité de survie, Fiabilité $\equiv 1 - p_f$

$\boxed{p_f}$: Probabilité de défaillance ($f \rightarrow$ "fail")

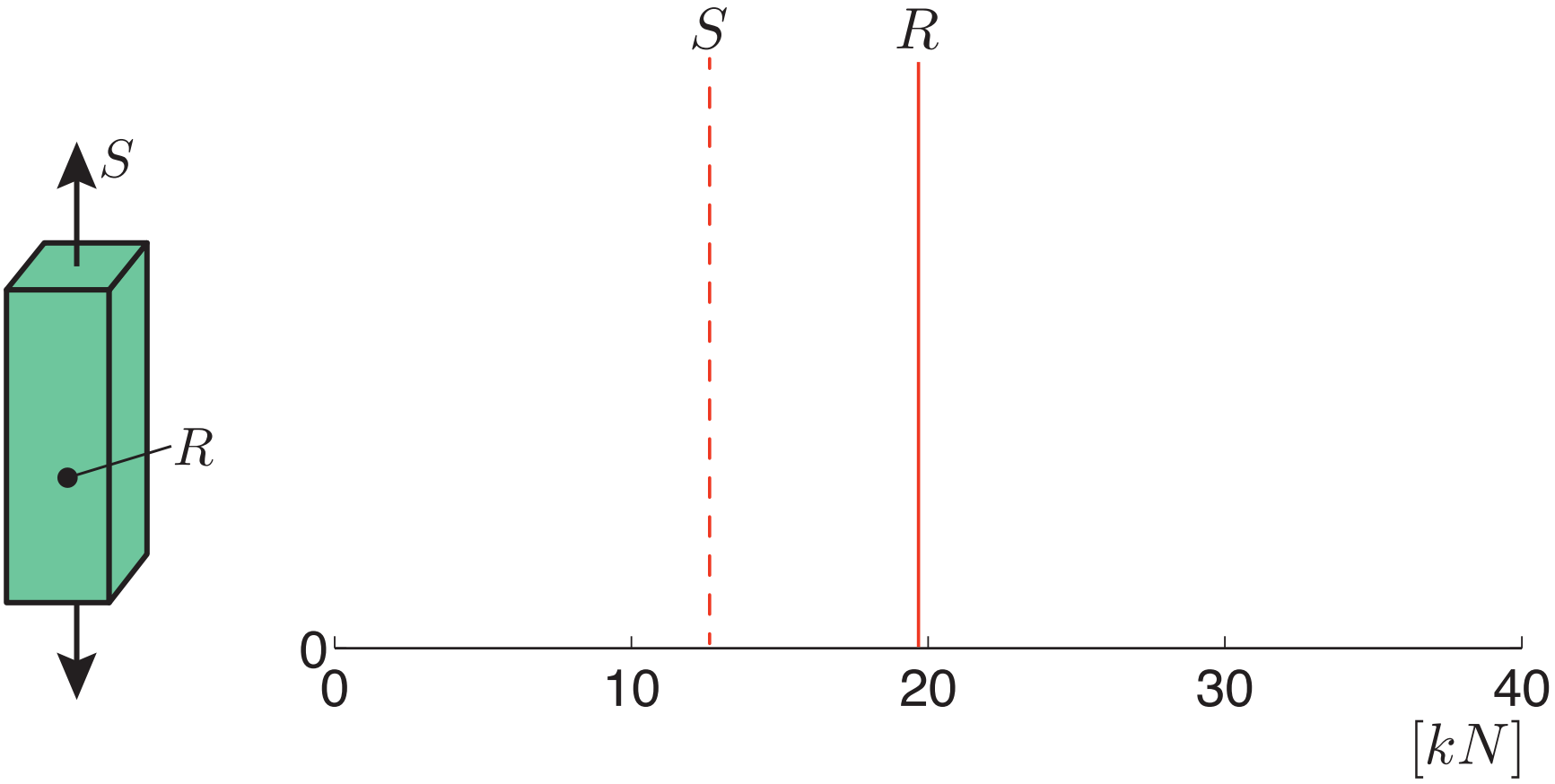
Probabilité de défaillance



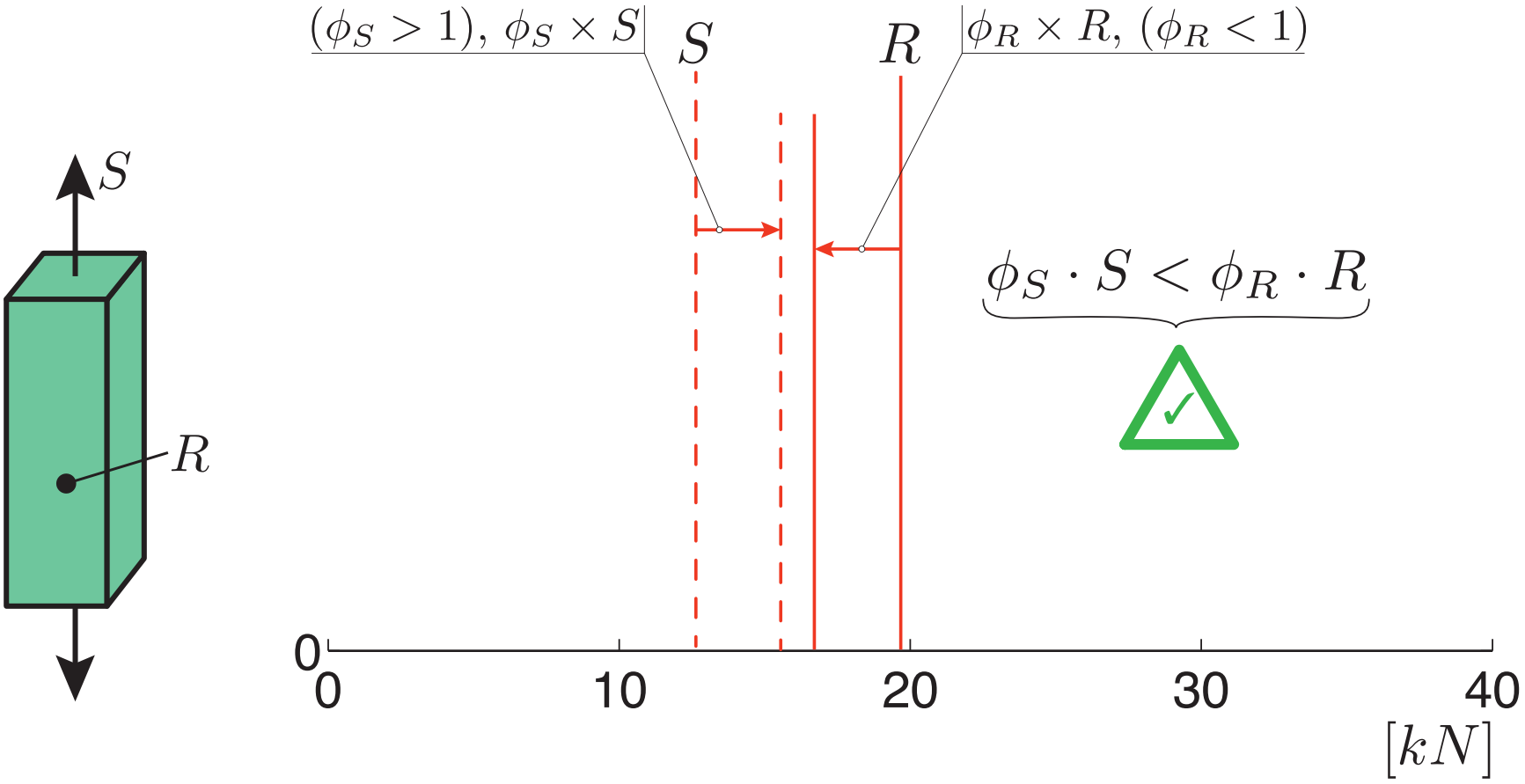
Probabilité de défaillance



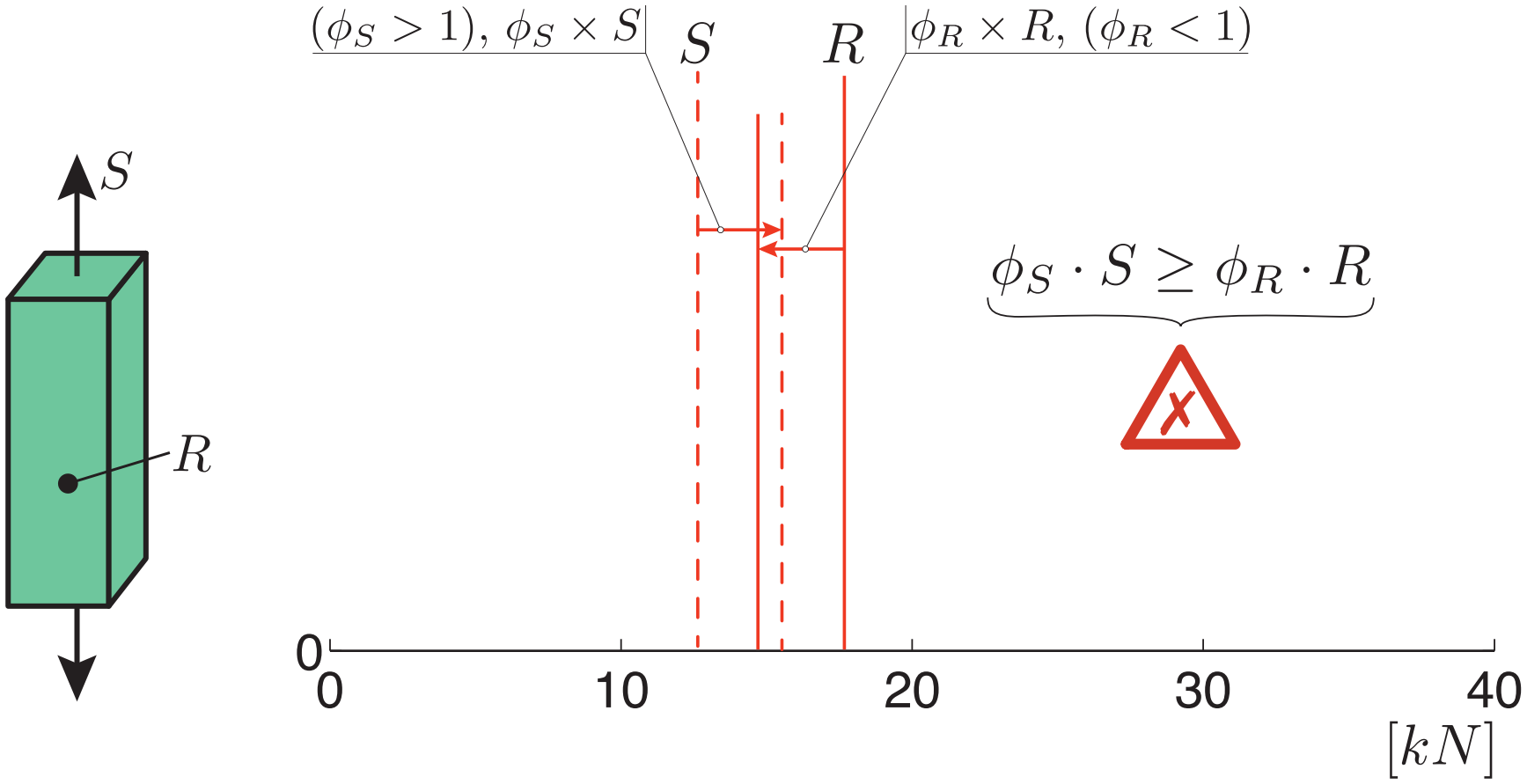
Probabilité de défaillance



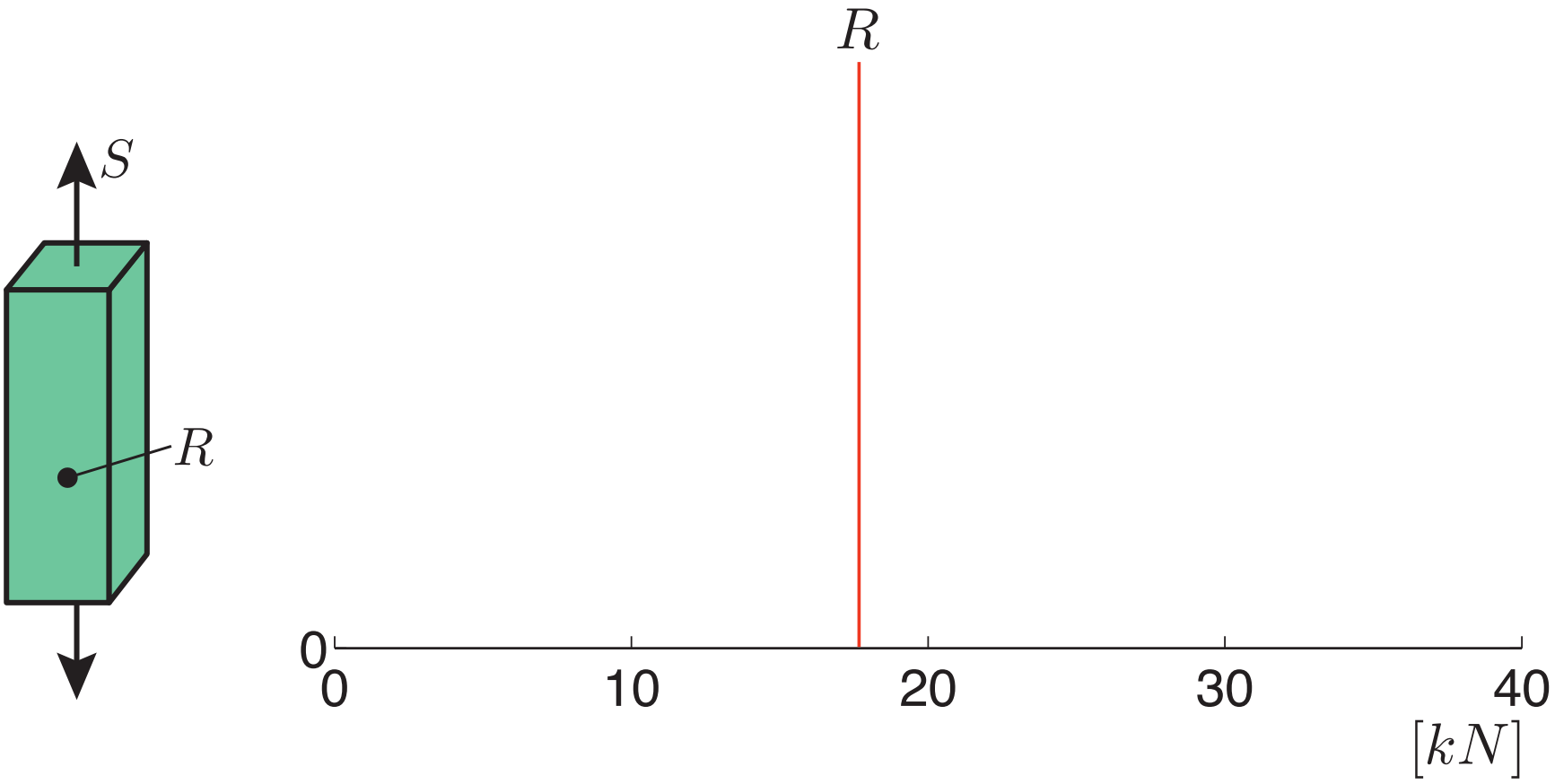
Probabilité de défaillance



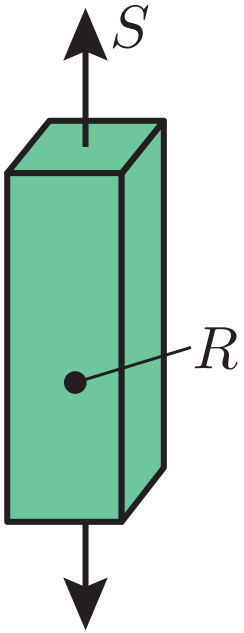
Probabilité de défaillance

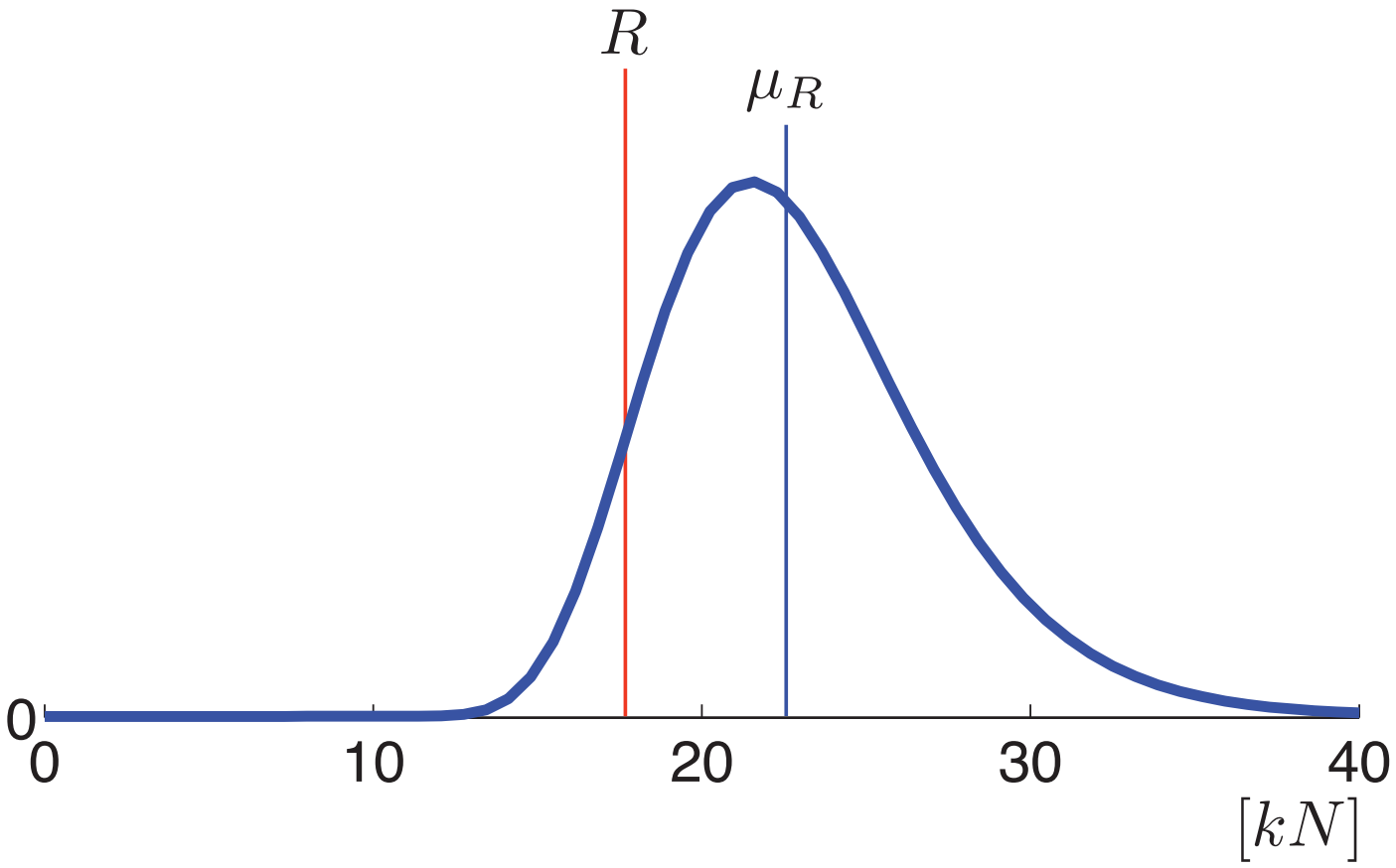


Probabilité de défaillance

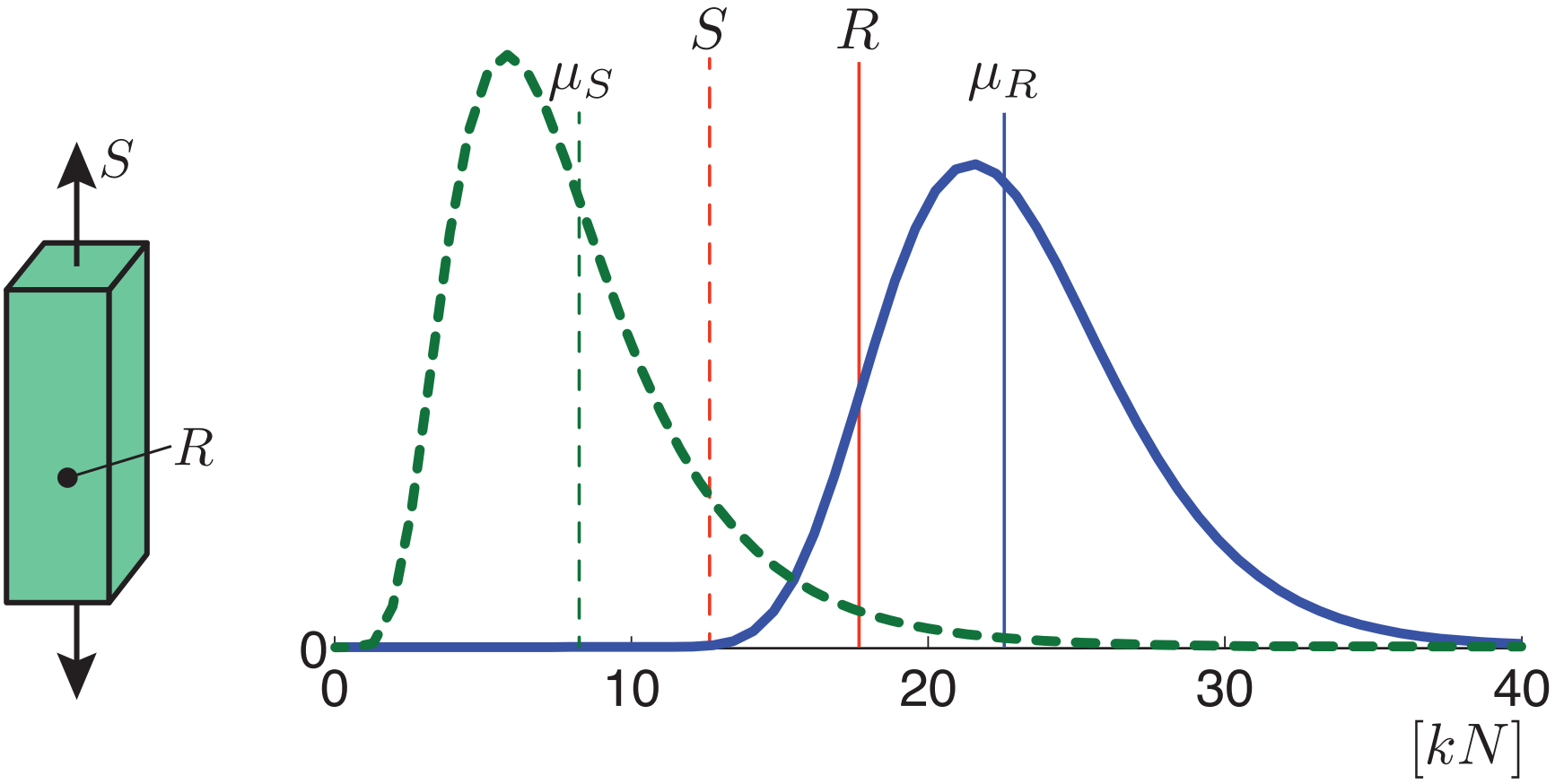


Probabilité de défaillance

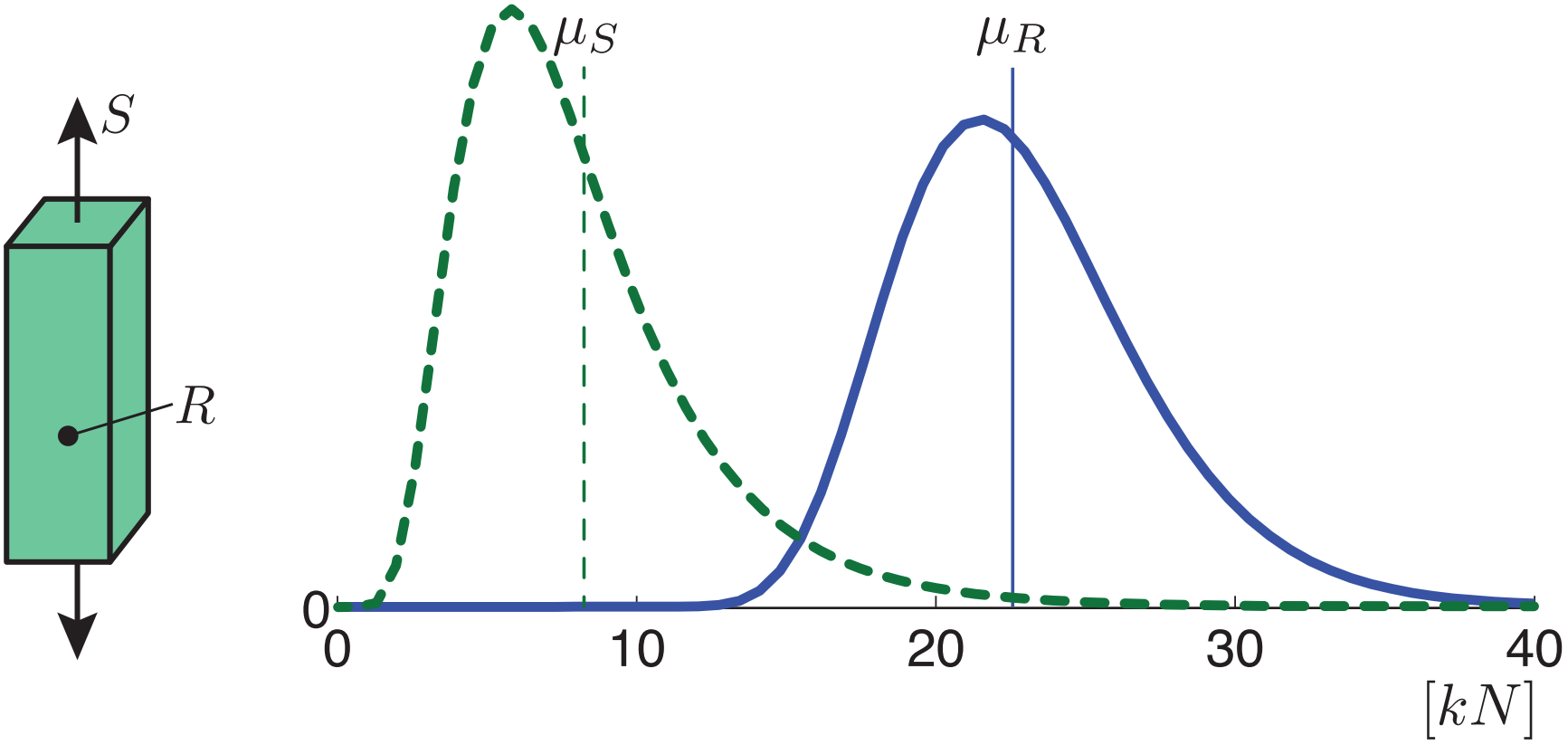




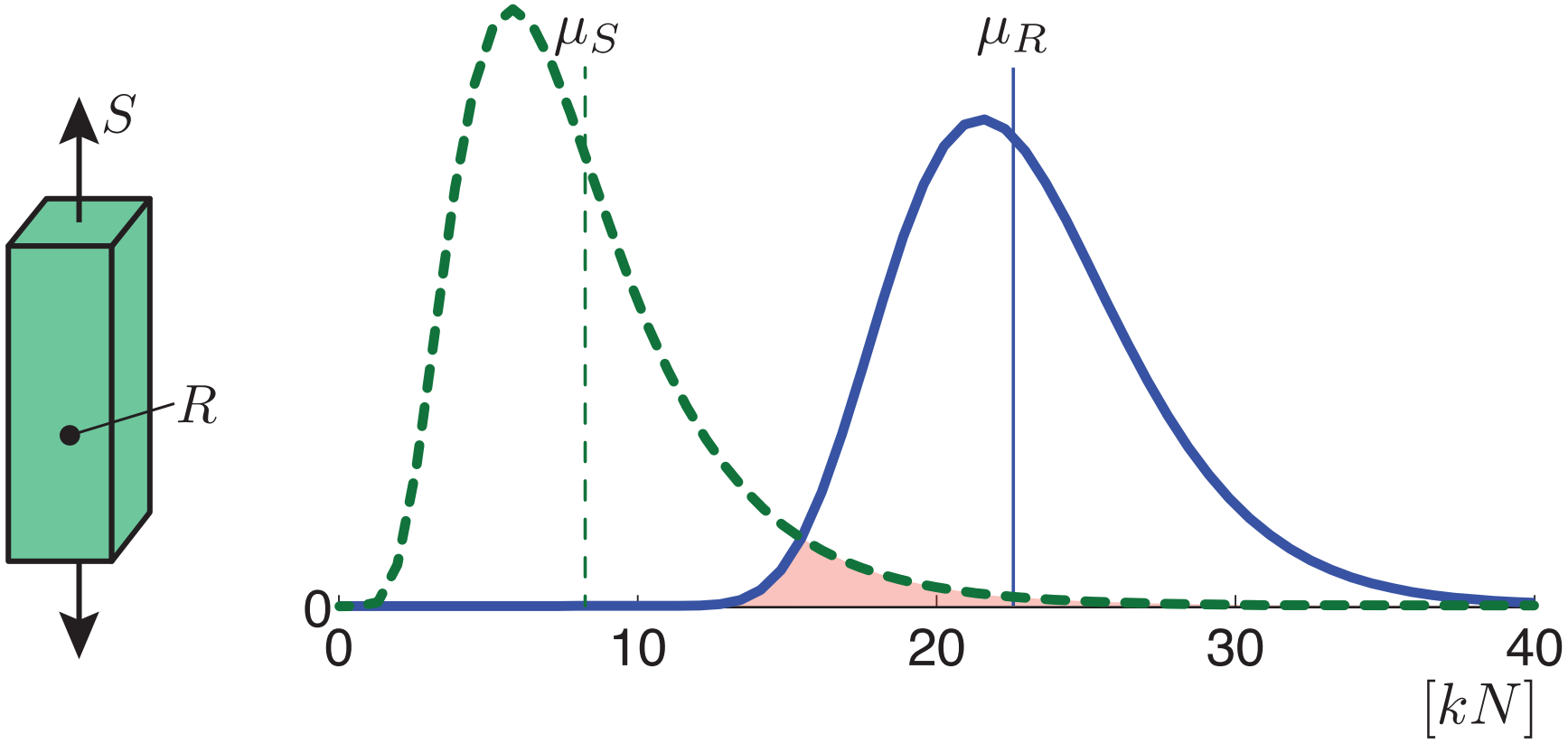
Probabilité de défaillance



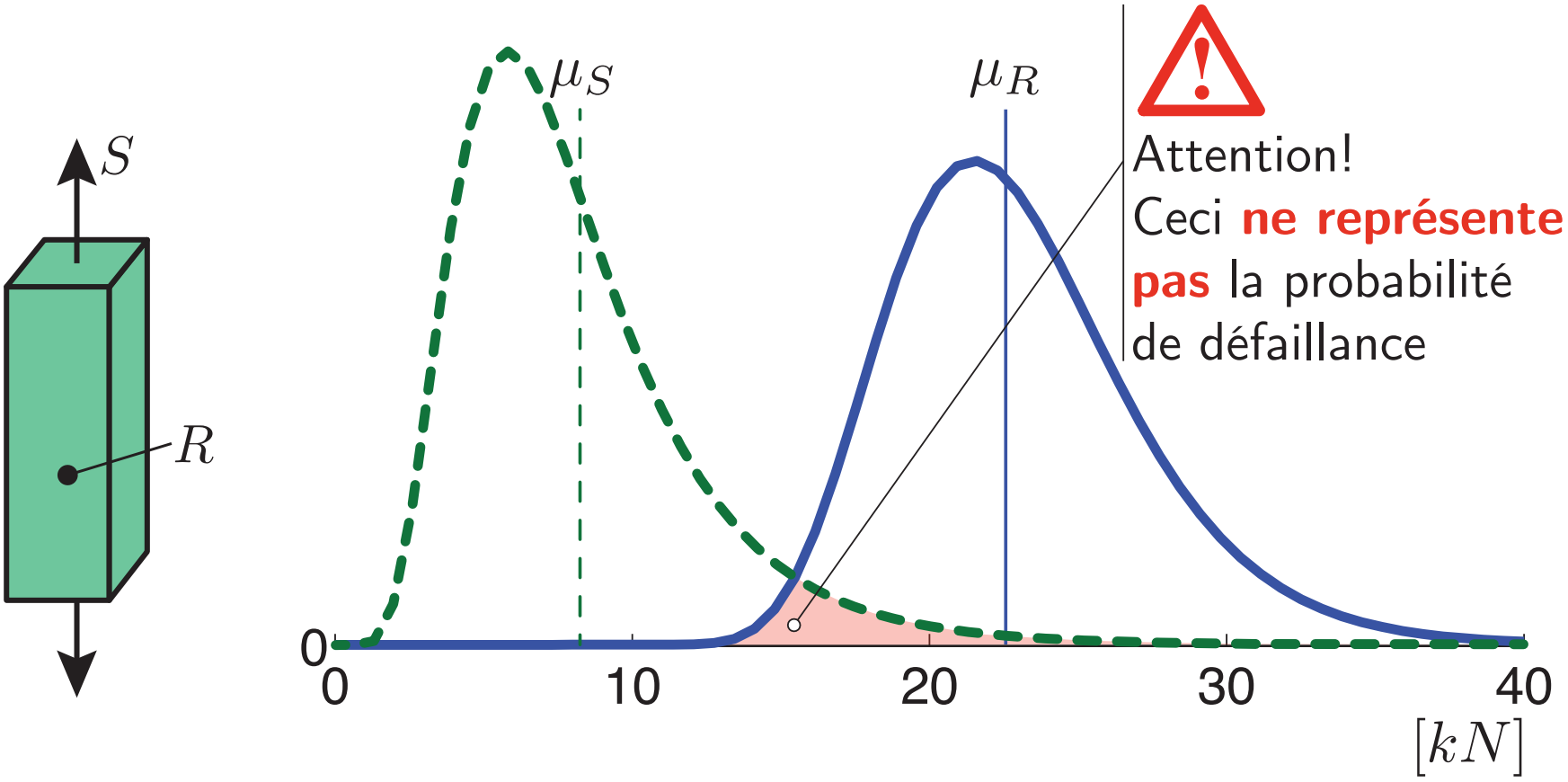
Probabilité de défaillance



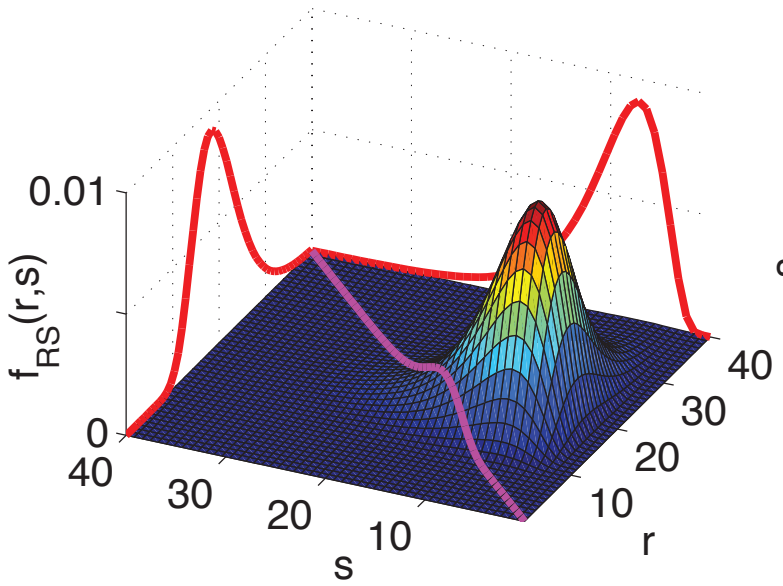
Probabilité de défaillance

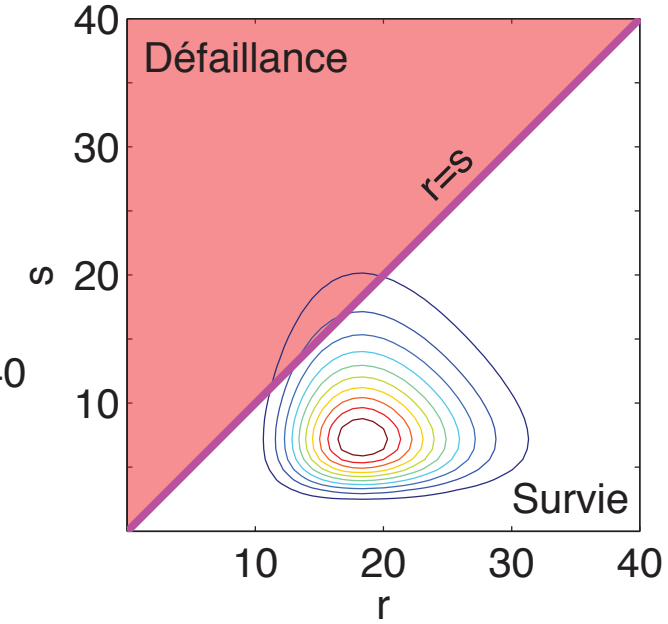


Probabilité de défaillance



Fiabilité des structures





Avant d'en arriver là...

- Révision algèbre & théorie de la probabilité
- Module 1 - Lois de probabilité univariées (marginales)
- Module 2 - Formulation des problèmes de fiabilité
- Module 3 - Lois de probabilité multivariées (conjointes)

Pourquoi s'intéresse-t-on à la fiabilité?

La fiabilité est une mesure de la capacité d'un système à remplir ses fonctions (e.g. sécurité et aptitude au service) étant donné notre connaissance de celui-ci.

La fiabilité est une réflexion de notre connaissance et non pas une propriété fondamentale d'un système

La fiabilité d'un système est utilisée afin de déterminer si le **risque** encouru est acceptable.

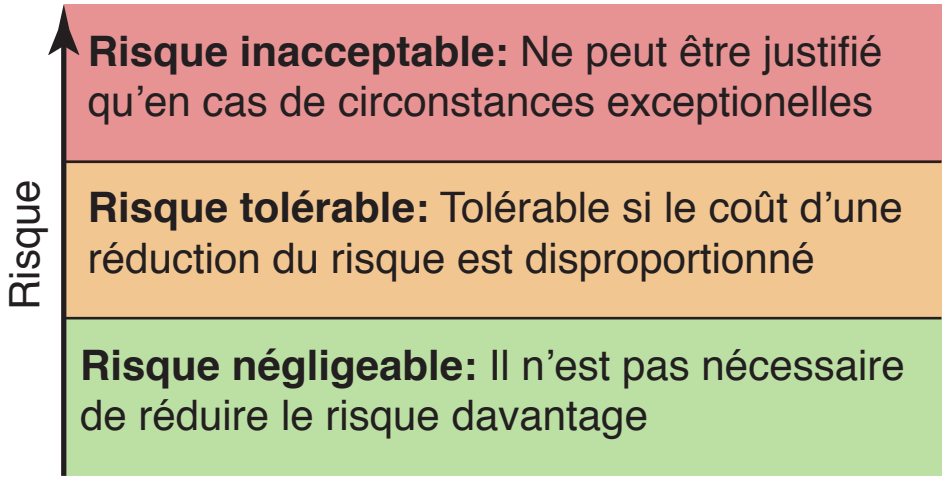
Risque: probabilités $\times$ conséquences

Plan de la section

Risque

2.1 Fiabilité & risques
2.2 Risque individuel
2.3 Risque de société
2.4 p_f cible
2.5 Risque & calibration des codes

Risque



Risque individuel: La référence est habituellement la probabilité annuelle de décès ou de blessure accidentelle

Risque de société: La référence est habituellement le nombre moyen de décès annuel attendu.

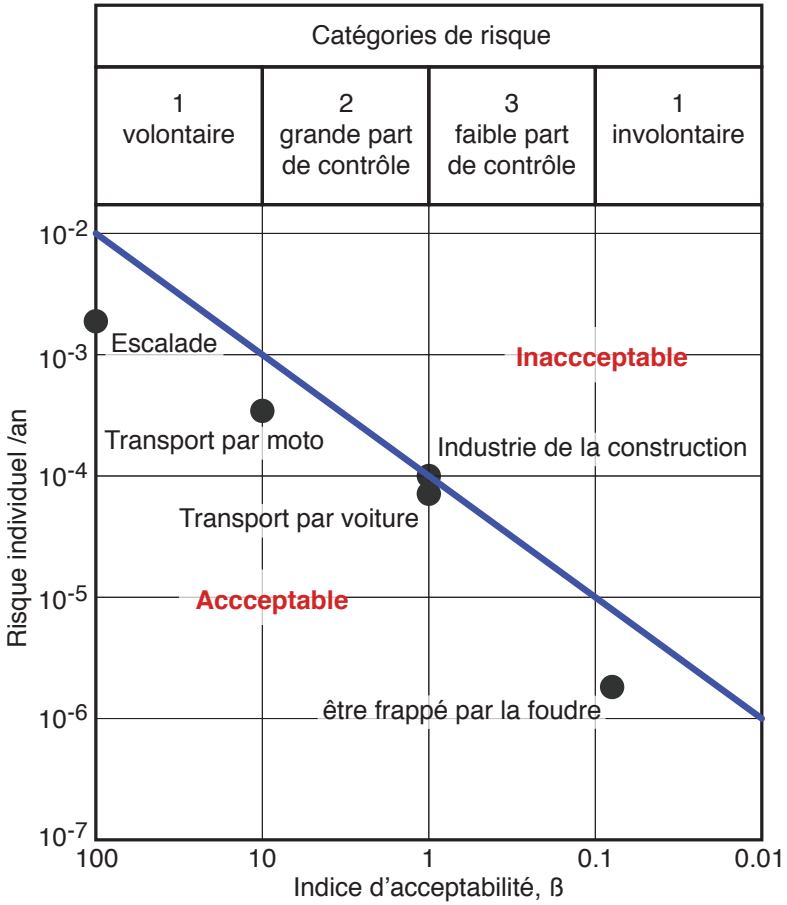
D. Diamantidis, *Background documents on risk assessment in engineering, risk acceptance criteria*, Tech. Rep. Document #3, JCSS - Joint Committee of Structural Safety, 2008

Risque individuel acceptable, RI

Exemple de limite de risque individuel acceptable (Comité TAW, 1985)

$$RI < \beta \times 10^{-4}/\text{an}$$

Note: l'indice d'acceptabilité β n'a pas de lien avec l'indice de fiabilité β



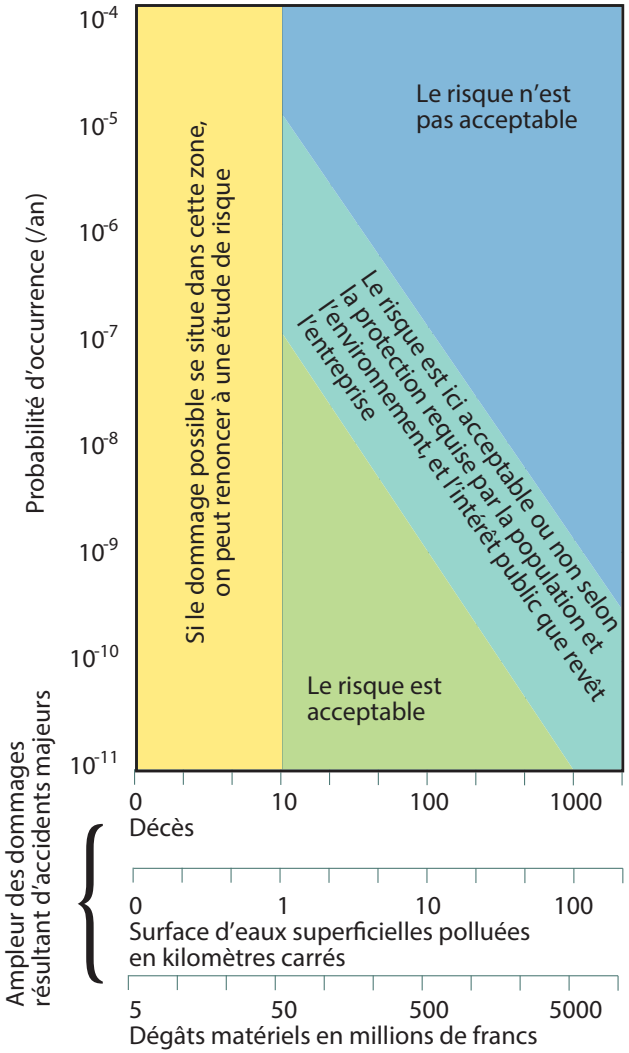
S. Jonkman, P. Van Gelder, and J. Vrijling, *An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage*, Journal of Hazardous Materials, vol. 99, no. 1, pp. 1–30, 2003.

Risque de société acceptable

Exemple d'acceptabilité du risque pour des évènements touchant la société

$$\approx \frac{26\,\text{semaines/an}}{14\,000\,000}$$

$$= 2 \times 10^{-6}\,/\text{an}$$



OFEFP, *Critères d'appréciation pour l'ordonnance sur les accidents majeurs*, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne, 1996.

Valeurs cibles de fiabilité pour les structures

Probabilité de défaillance type pour l'évaluation d'un pont (soumis à des inspections régulières & défaillance ductile)

$$p_f = 2.3 \times 10^{-4}/\text{an}$$

Taux annuel de décès dû aux effondrements

$$\approx 10^{-7}/\text{an}$$

CSA, *CAN/CSA S6-06, Canadian highway bridge design code*, 2006, §14.12 - Target Reliability Index

D. Allen, *Canadian highway bridge evaluation: reliability index*, Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 19, no. 6, pp. 987–991, 1992.

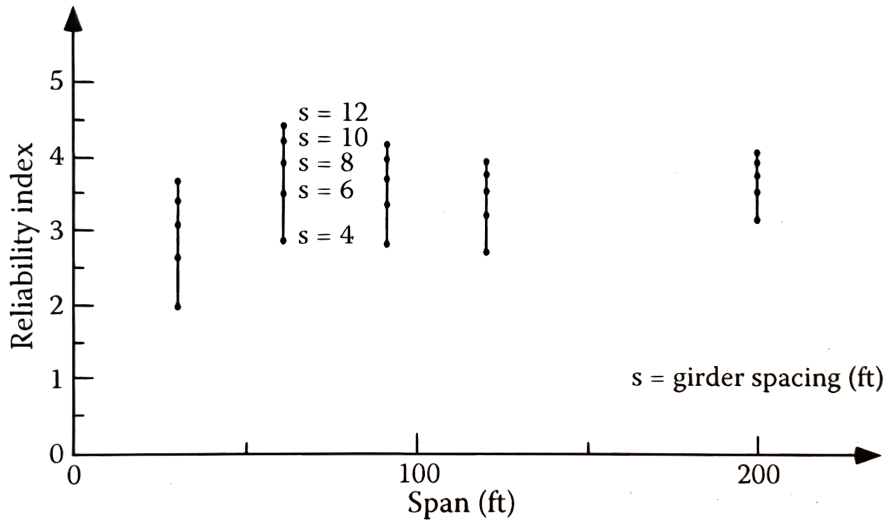
Calibration des codes

$$\overbrace{\overbrace{\alpha_d d + \gamma\psi(\alpha_l l + \alpha_w w + \alpha_t t)}^{\text{solicitations, } s_f} < \overbrace{\phi_y f_y a}^{\text{résistance, } r_f}}^{\text{Coefficients de pondérations} - \alpha_\cdot, \gamma, \psi, \phi}$$

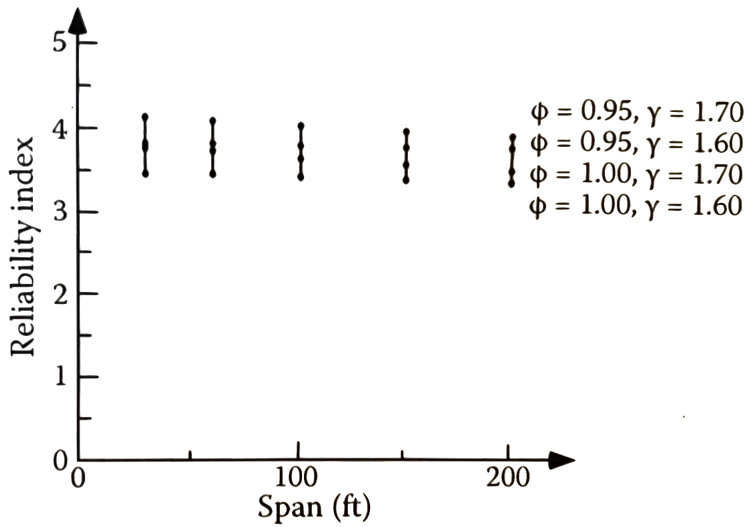
D'où viennent les coefficients $\alpha_\cdot, \gamma, \psi, \phi$?

Calibration des codes – Exemple AASHTO

Facteurs de sécurité / Contraintes admisibles ($< 1990'$)



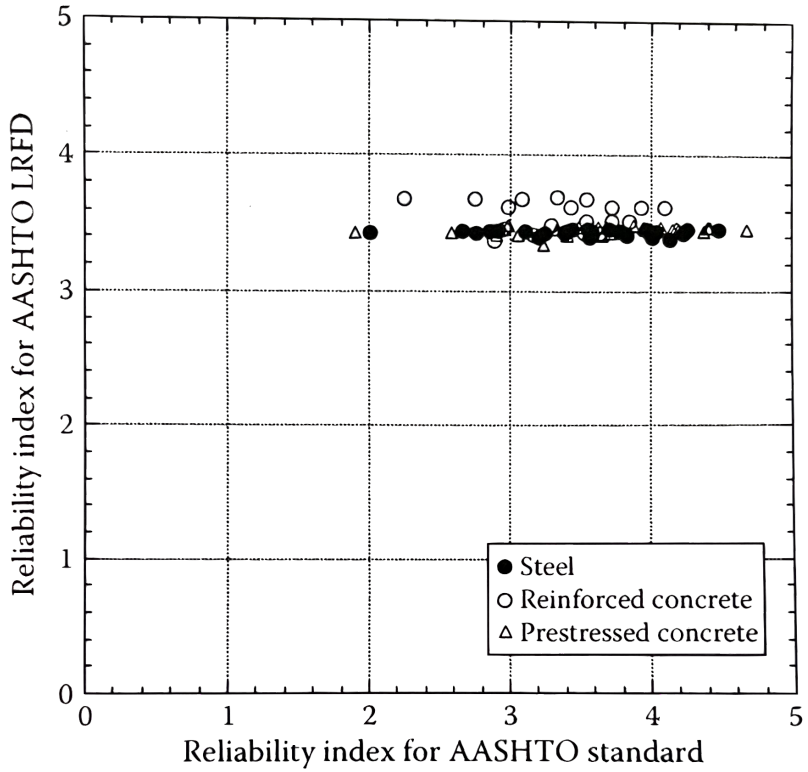
LRFD / Coefficients de pondérations ($> 1990'$)



Calibration de $\alpha_{\cdot}, \gamma, \psi, \phi \rightarrow$ même indice de fiabilité, $\beta = \text{fct.}(p_f)$

[Nowak and Collins (2012), *Reliability of structures*, CRC press.]

Calibration des codes [ ]



Même procédure pour tous les codes modernes

- AASHTO – Ponts
- CSA S6 – Ponts
- CNB – Bâtiments
- ACI 318 – Béton
- ANSI/AISC 360 – Acier
- Eurocodes
- ...

⚠ toutes les analyses de fiabilité ne sont pas égales...

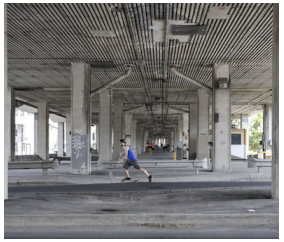
[Nowak and Collins (2012), *Reliability of structures*, CRC press.]

Niveaux d'analyse

Niveau 1 Approche déterministe reposant sur les codes
(Analyses conservatrices pour des structures typiques)

Niveau 2 Approche probabiliste simplifiée
R & $S \rightarrow$ variables aléatoires
(Calibration des codes)

Niveau 3 Approche probabiliste
$R(\boldsymbol{\theta}) : \ \boldsymbol{\theta} = \{E, f_y, f_c, \cdots\} \rightarrow$ variables aléatoires
(Ouvrages d'envergures où N1 & N2 $\rightarrow$ \$\$\$)



Comment calculer l'indice de fiabilité avec niveaux 2 & 3?

[HQ, La Presse, Radio-Canada]

Plan de la section

Plan de cours

3.1 Où le trouver?
3.2 Buts du cours
3.3 Évaluations
3.4 Travaux pratiques
3.5 Documentation & logiciel
3.6 Échéancier
3.7 Varia

Plan de cours – disponible sur moodle

PLAN DE COURS
CIV8530 – Fiabilité des structures et systèmes
Automne 2019 | Département CGM – Polytechnique Montréal

Crédits	3cr (3 - 0 - 6)
Horaire cours	Mardi : 08h30 – 11h20
Local	L–2712
Préalables	MTH2302C, INF1005A, MEC1410
Professeur	James-A. Goulet (bureau B-431.4.6)
Disponibilité	Mardi : 11h20 –12h00 & Jeudi 15h30 – 17h00

1 Description de l'annuaire

Méthodes analytiques et numériques d'estimation de la fiabilité des structures et généralisation pour les systèmes du génie civil. Représentation de la défaillance de composantes ou de systèmes structuraux par des fonctions d'états limites. Estimation de la fiabilité des structures à partir d'approximations analytiques du premier ordre MCFOSM/FORM, de deuxième ordre FORM, et d'échantillonnage Monte-Carlo. Mesures d'importance et de sensibilité des paramètres quant à la fiabilité des structures. Traitement des incertitudes et intégration de données empiriques dans le calcul de la fiabilité.

2 Objectifs

Le cours vise à apprendre à :

- Estimer la fiabilité de composantes et de systèmes structuraux à partir de méthodes analytiques et numériques
- Représenter la défaillance d'une structure par des fonctions d'états limites
- Décrire la capacité des structures et de la demande par des lois de probabilité
- Estimer l'importance de paramètres dans la fiabilité de composantes structurales
- Identifier les sources et types d'incertitudes et les inclure dans l'estimation de la fiabilité des structures
- Utiliser un logiciel de calcul de la fiabilité des structures (FERUM/Matlab)
- Appliquer les connaissances acquises à d'autres systèmes du génie civil (mines, transport et environnement)

(Dernière mise à jour : 2019/06/25, 10:33:51) 1/5

Quels sont les buts du cours?

1- Formuler les problèmes de fiabilité

2- Estimer une probabilité de défaillance

3- Analyser les facteurs influençant la fiabilité

Comprendre la théorie afin de pouvoir utiliser les logiciels de calculs (Pystra/PyRe)

Évaluations

1. Travaux pratiques: $6 \times 5\% = 30\%$
2. Examen partiel: 35%
3. Examen final: 35%

Travaux pratiques

- 5 travaux pratiques (TP1 déjà sur moodle)
- Équipes de **2 personnes** maximum.
- La collaboration entre équipes est encouragée
  → **un devoir/code par équipe** (LaTeX)
- Fournir une solution complète pour chaque problème
- Procédure d'autocorrection → moodle

Remise électronique des TPs **la veille du cours 20h00**
https://www.dropbox.com/request/0it1pY99rTdyth9UHvVk

Remise électronique des TPs corrigés **le jour du cours de la semaine suivante à 12h00**

Lectures préparatoires [ ]

L'option "facile"

Documentation & logiciels

Lectures hebdomadaires: indiquées dans le plan de cours et disponibles sur moodle

Vidéos des cours: en ligne sur YouTube

Diapositives : en ligne sur moodle

Questions de révision : en ligne sur moodle

Logiciel : Pystra/PyRe sont disponible sur moodle

Programme du cours

PLAN DE COURS
CIV8530 – Fiabilité des structures et systèmes
Automne 2019 | Département CGM – Polytechnique Montréal

Crédits	3cr (3 - 0 - 6)
Horaire cours	Mardi : 08h30 – 11h20
Local	L–2712
Préalables	MTH2302C, INF1005A, MEC1410
Professeur	James-A. Goulet (bureau B-431.4.6)
Disponibilité	Mardi : 11h20 –12h00 & Jeudi 15h30 – 17h00

1 Description de l'annuaire

Méthodes analytiques et numériques d'estimation de la fiabilité des structures et généralisation pour les systèmes du génie civil. Représentation de la défaillance de composantes ou de systèmes structuraux par des fonctions d'états limites. Estimation de la fiabilité des structures à partir d'approximations analytiques du premier ordre MCFOSM/FORM, de deuxième ordre FORM, et d'échantillonnage Monte-Carlo. Mesures d'importance et de sensibilité des paramètres quant à la fiabilité des structures. Traitement des incertitudes et intégration de données empiriques dans le calcul de la fiabilité.

2 Objectifs

Le cours vise à apprendre à :

- Estimer la fiabilité de composantes et de systèmes structuraux à partir de méthodes analytiques et numériques
- Représenter la défaillance d'une structure par des fonctions d'états limites
- Décrire la capacité des structures et de la demande par des lois de probabilité
- Estimer l'importance de paramètres dans la fiabilité de composantes structurales
- Identifier les sources et types d'incertitudes et les inclure dans l'estimation de la fiabilité des structures
- Utiliser un logiciel de calcul de la fiabilité des structures (FERUM/Matlab)
- Appliquer les connaissances acquises à d'autres systèmes du génie civil (mines, transport et environnement)

(Dernière mise à jour : 2019/06/25, 10:33:51) 1/5

Le programme sera adapté en fonction de la progression...

Questions

?

Forum moodle

Pauses

(10 min)

Organisation de la matière

Théorie probabilité

- 0 Révision algèbre & probabilités
- 1 Lois de probabilités
- 3 PDF multivariés

Fiabilité des structures & systèmes

- Introduction
- 2 Formulation fiabilité composantes
- 9 Formulation fiabilité systèmes

Estimation – p_f échantilonnage

- 4 Monte Carlo
- 12 Échantillonnage par importance

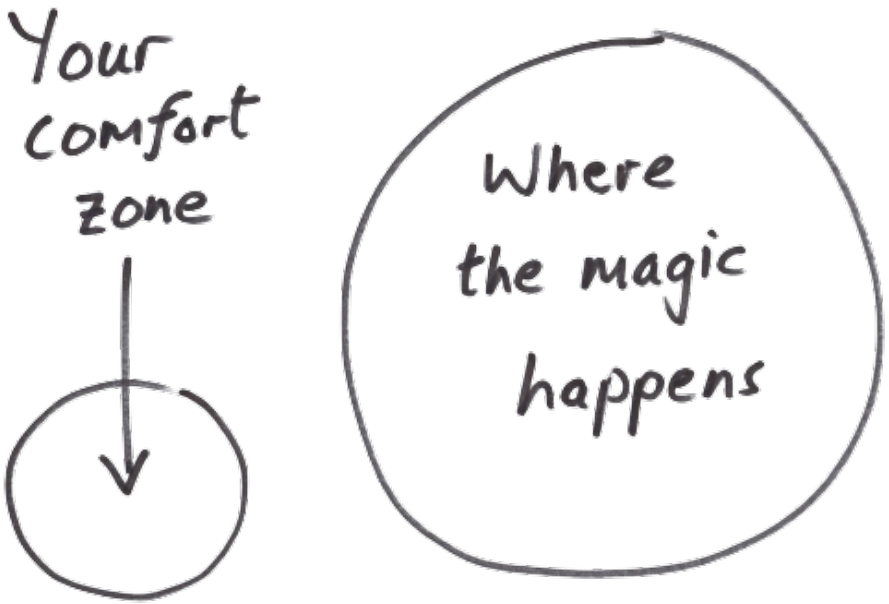
Estimation – p_f analytique

- 5 FOSM
- 6 FORM
- 8 SORM

Utilisation des résultats

- 7 Analyse de sensibilité
- 10 Incertitudes aléatoires & épistémiques
- 11 Données empiriques
- 13 Prise de décision
- 14 Métamodèles & modèles empiriques

Organisation de la matière



[intrigueme.ca]

Rappel - Algèbre & théorie de la probabilité

Mise à niveau/rappel des connaissances

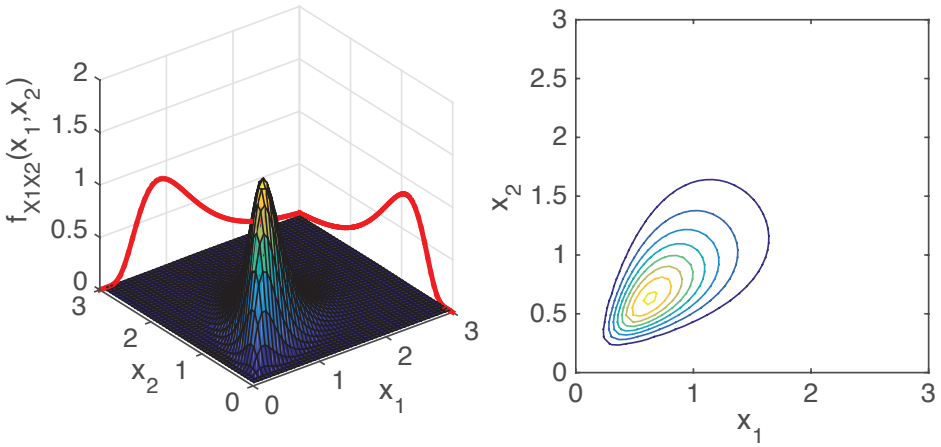
- Algèbre linéaire
- Évènements & ensembles
- Variable aléatoire & densité de probabilité
- Espérance mathématique
- Théorème de Bayes
- Fonctions de variables aléatoires

Module 1 - Lois de probabilité [ ]

Une **loi de probabilité** décrit la **densité de probabilité (PDF)** d'un phénomène physique

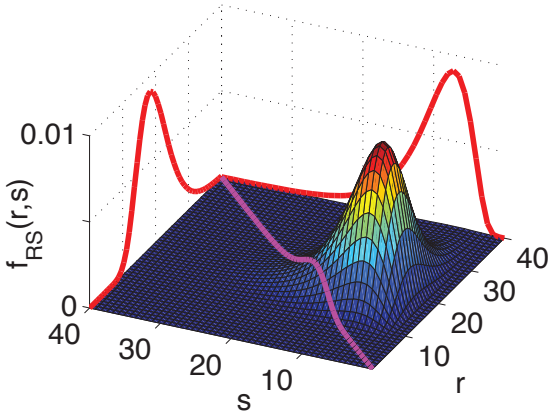
Nous allons voir certaines d'entre elles:

1. Loi normale
2. Loi lognormale
3. Loi Gamma
4. Loi Gumbel
5. Loi Beta



e.g. : loi lognormale

Module 2 - Formulation des problèmes de fiabilité [ ]



Comment formule-t-on des problèmes de fiabilité?

1. **Cas spécial**: Capacité-demande
2. **Cas général**: Fonction d'état limite

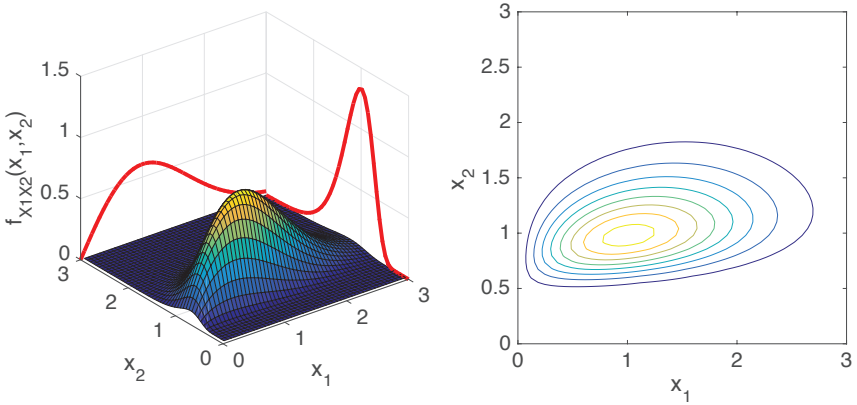
Estimation de la **fiabilité: intégrale en plusieurs dimensions**

Dans la majorité des cas, il n'existe **pas de solution analytique exacte** ⚠

Module 3 - Densités de probabilité multivariées [ ]

Comment modéliser la **densité de probabilité conjointe** à partir des densités de probabilités marginales?

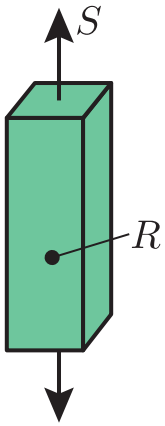
1. Loi Morgenstern
2. Loi Nataf

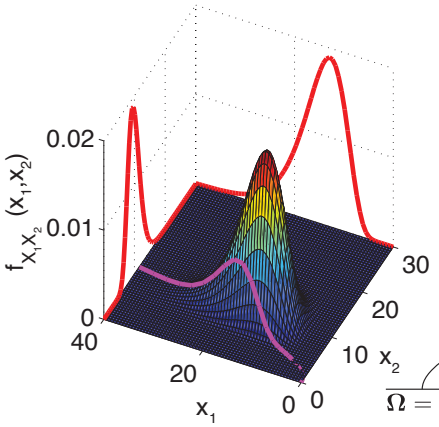


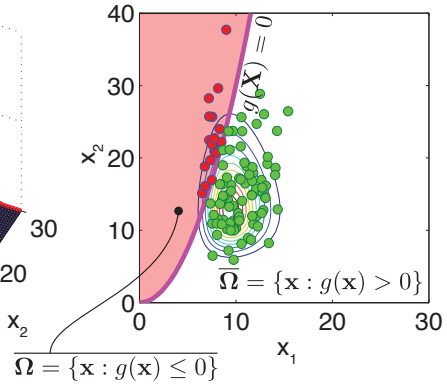
Module 4 - Échantillonnage Monte-Carlo [ ]

Estimation de la fiabilité: intégrale en plusieurs dimensions

1. Intégration Monte-Carlo
2. Application à la fiabilité
3. Limitations







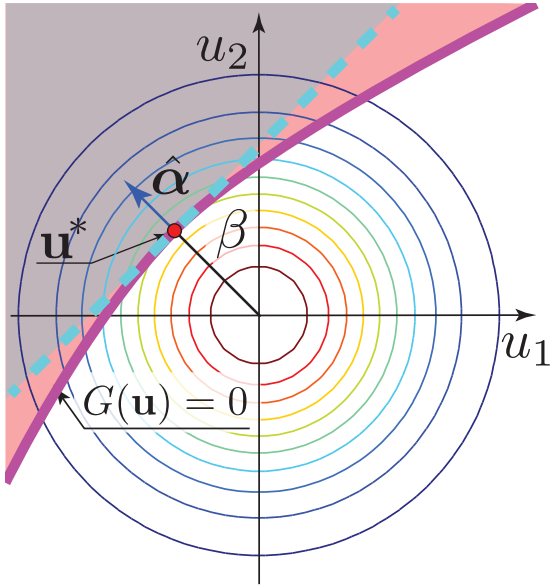
Échantillonnage Monte Carlo =

Module 5 - Approximation MCFOSM & FOSM [ ]

Estimation de la fiabilité: intégrale en plusieurs dimensions

MCFOSM & FOSM: Approximation du premier ordre avec moments du second ordre
(First-Order Second Moments)

MCFOSM/FOSM =



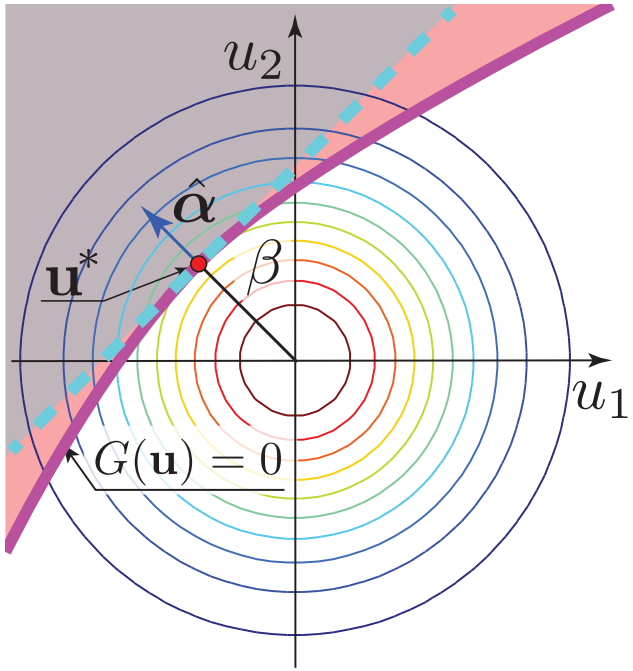
Avec **MCFOSM & FOSM**, *on assume que l'on ne connait que les moyennes et les variances des variables aléatoires.*

Module 6 - Approximation FORM [ ]

Estimation de la fiabilité: intégrale en plusieurs dimensions

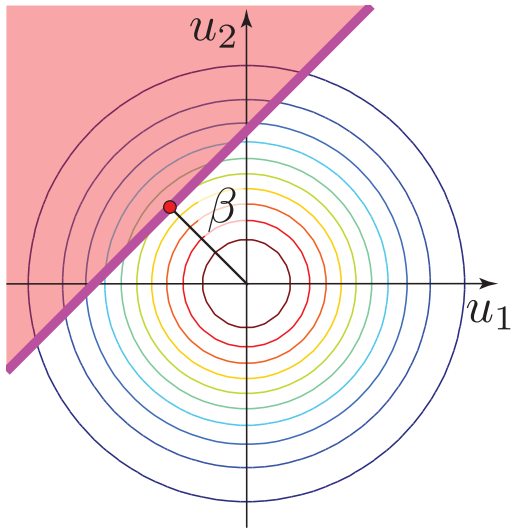
FORM: Approximation du premier ordre utilisant la distribution conjointe des variables aléatoires (First-Order Reliability Method)

FORM/SORM =



Module 7 - Analyse de sensibilité [ ]

1. Quelle est l'importance relative de chaque variable aléatoire dans la fiabilité?
2. Comment estimer les coefficients de pondération des codes $\alpha_d d + \gamma\psi(\alpha_l l + \alpha_w w + \alpha_t t) < \phi_y f_y a$?
3. Si les variables aléatoires sont elles-mêmes décrites par des paramètres, quelle est l'importance relative de ces paramètres dans la fiabilité?



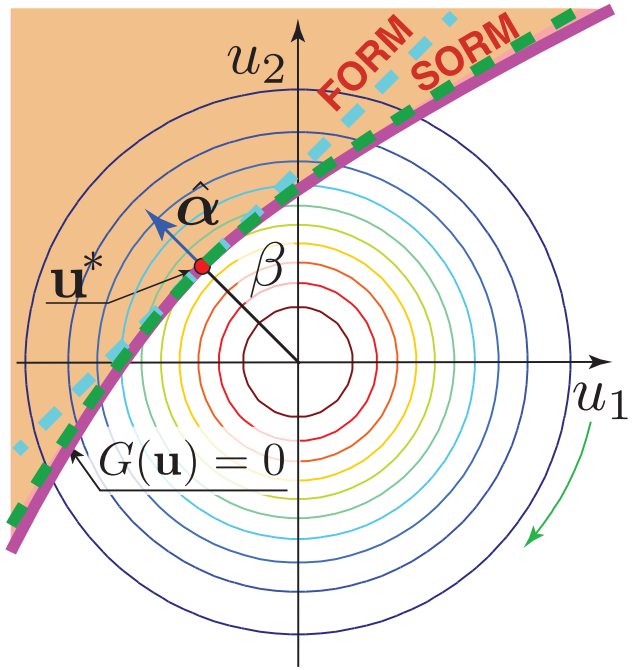
Solution: Approximations analytiques basées sur FORM

Module 8 - Approximation SORM [ ]

Estimation de la fiabilité: intégrale en plusieurs dimensions

SORM: Approximation du deuxième ordre utilisant la distribution conjointe des variables aléatoires (Second-Order Reliability Method)

FORM/SORM =



Module 9 - Fiabilité des systèmes [ ]

Comment formuler les problèmes de fiabilité des systèmes?

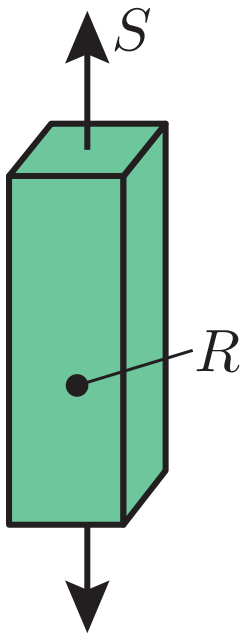
Comment estimer leur $p_{f,\text{sys.}}$?

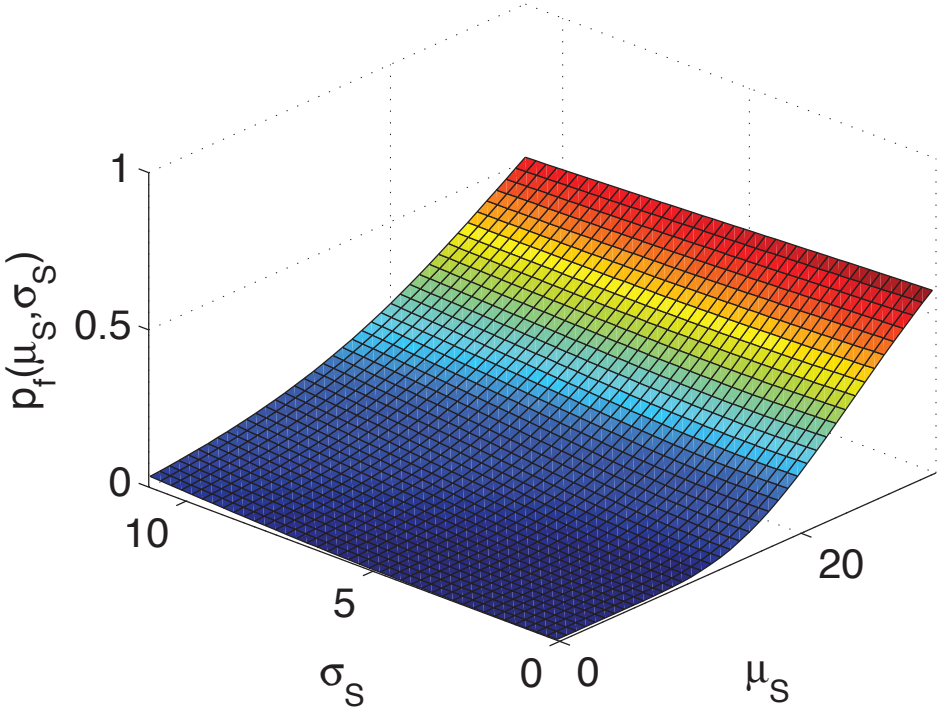
1. Formulation
2. Application de méthodes analytiques (FORM)
3. Application de méthodes numériques (Monte-Carlo)

[Radio-Canada]

Module 10 - Analyses des incertitudes [ ]

Comment se répercute l'incertitude des paramètres sur la probabilité de défaillance p_f ?

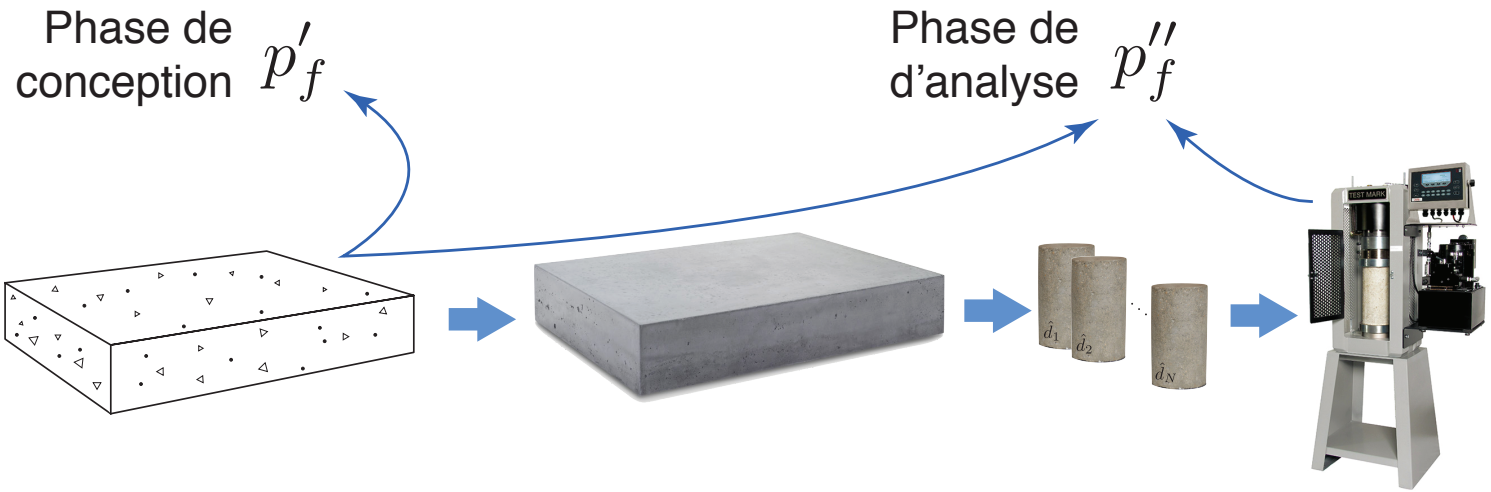




Module 11 - Observations empiriques [ ]

Comment réduire les incertitudes à l'aide de mesures?

1. Sources et types d'incertitudes
2. Types de mesures & observations
3. Théorie: Estimation Bayesienne

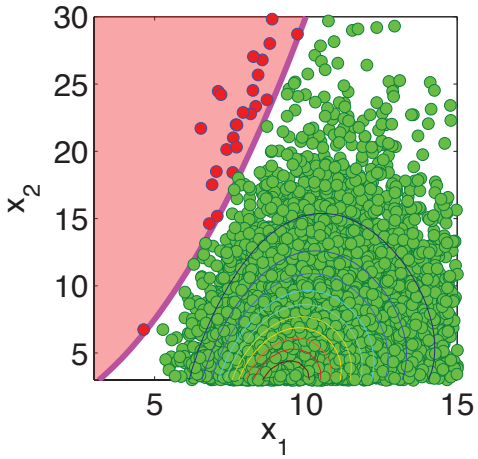


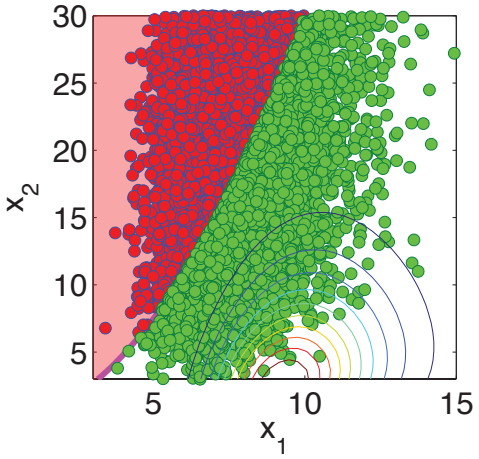
Module 12 - Techniques d'échantillonnage avancées [ ]

Comment estimer numériquement p_f en utilisant un minimum de ressources de calcul?

Échantillonnage Monte Carlo =

Échantillonnage avancé =





Module 13 - Prise de décisions [ ]

Analyse sur simplifiée

$p_f > p_{f,\textbf{adm.}} \rightarrow$ **remplacer ($\mathcal{R}$)** ou **attendre ($\mathcal{A}$)**?

Risque: probabilités $\times$ conséquences ($)

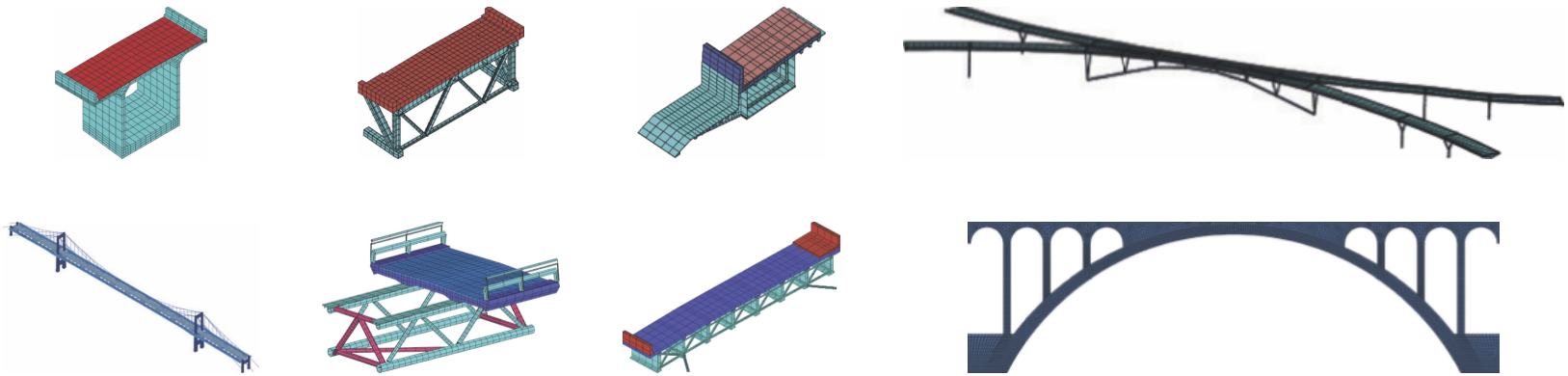
Théorie de l'utilité:

$$\mathbb{E}(\$|\mathcal{A}) = p_f \times \$ \text{ fail}$$
$$\mathbb{E}(\$|\mathcal{R}) = \$\mathcal{R}$$

- 1 $ aujourd'hui $\neq$ 1 $ dans 20 ans (**actualisation des coûts**)
- Un gain de 1 $ n'a pas la même utilité selon si on à déjà 1 $ ou 1 000 000 $ (**aversion du risque**)

[Beyond Ktaadn,Bloomberg]

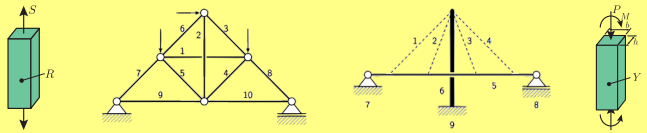
Module 14 - Métamodèles [ ]



Chaque évaluation de mon modèle me prend $> 1\,h$...!?

Métamodèle → un modèle d'un modèle

⚠ Ne vous emballez pas trop rapidement...



Organisation de la matière

Théorie probabilité

- 0 Révision algèbre & probabilités
- 1 Lois de probabilités
- 3 PDF multivariés

Fiabilité des structures & systèmes

- Introduction
- 2 Formulation fiabilité composantes
- 9 Formulation fiabilité systèmes

Estimation – p_f échantilonnage

- 4 Monte Carlo
- 12 Échantillonnage par importance

Estimation – p_f analytique

- 5 FOSM
- 6 FORM
- 8 SORM

Utilisation des résultats

- 7 Analyse de sensibilité
- 10 Incertitudes aléatoires & épistémiques
- 11 Données empiriques
- 13 Prise de décision
- 14 Métamodèles & modèles empiriques