

8^{èmes} Journées

Fiabilité des
MATÉRIAUX & DES STRUCTURES

Aix-en-Provence,
9 et 10 avril 2014



ECOSYSTEMES CONTINENTAUX
ECCOREV
ET RISQUES ENVIRONNEMENTAUX

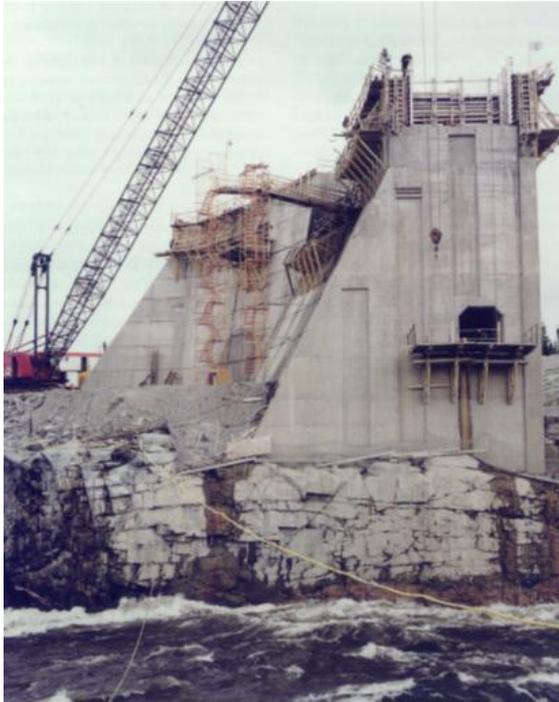


Stabilité structurale des barrages-poids: une approche de fiabilité pour l'évaluation des coefficients de sécurité au glissement

P. Léger, Professeur, École Polytechnique de Montréal, Canada
H. Kreuzer, Consultant, Suisse
O. Demory, Étudiant, École Polytechnique de Montréal, Canada



Stabilité structurale des barrages-poids: introduction rationnelle des incertitudes dans le calcul des "Coefficients de sécurité" - (Indicateurs de performance)



(1) Construction
conditions initiales



(2) Exploitation, Vieillesse
Observations / mesures –
incertitudes modérées - élevées



(3) Réhabilitation
ou non ?

INCERTITUDES

Résistance (R) – Sollicitations (L)

Plan

Stabilité structurale des barrages-poids: une approche de fiabilité pour l'évaluation des coefficients de sécurité au glissement

- Introduction
- Stabilité structurale et incertitudes
- Analyses Déterministes vs Fiabilité ($1 - P_f$)
- Concept du “*Coefficient de Sécurité Adaptable*” (AFS)
- Couplage **R** (résistance) – **L** (sollicitations ; sous-pression)
- Applications barrage-poids 18m (FS_{det} , AFS, P_f)
- Conclusions

INTRODUCTION – Coefficient sécurité au glissement

ACB (2007) – ANCOLD (2013)

- Coefficient de sécurité déterministe - glissement (FS_{Det})
- Réduction de FS_{Det} de 3 à 2 si les incertitudes de $\tan\phi$ et C sont diminuées
- Pas d'approche rationnelle pour les réductions proposées de FS_{Det}

$$FS_{Det} = R / L = [V \tan \phi + C A_c] / H$$

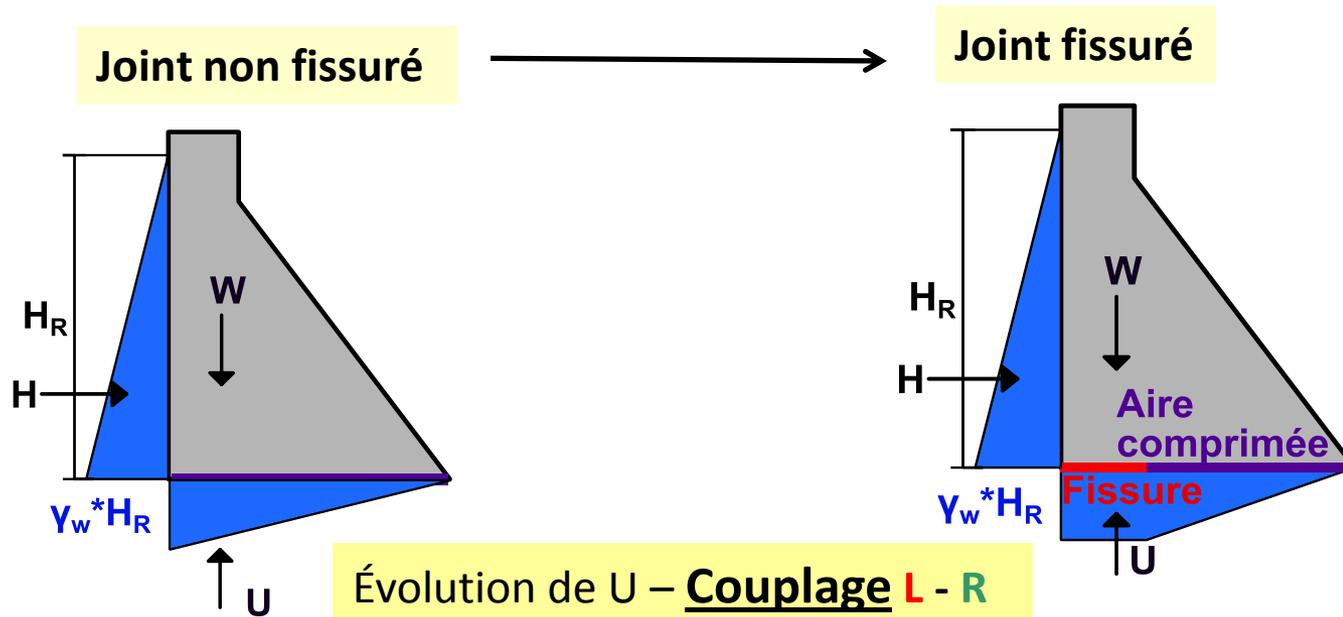
V = Somme des forces (effectives) verticales ($W - U$)

H = Somme des forces horizontales

A_c = Aire comprimée (fonction de la longueur fissurée)

C = cohésion (réelle ou apparente)

ϕ = angle de friction



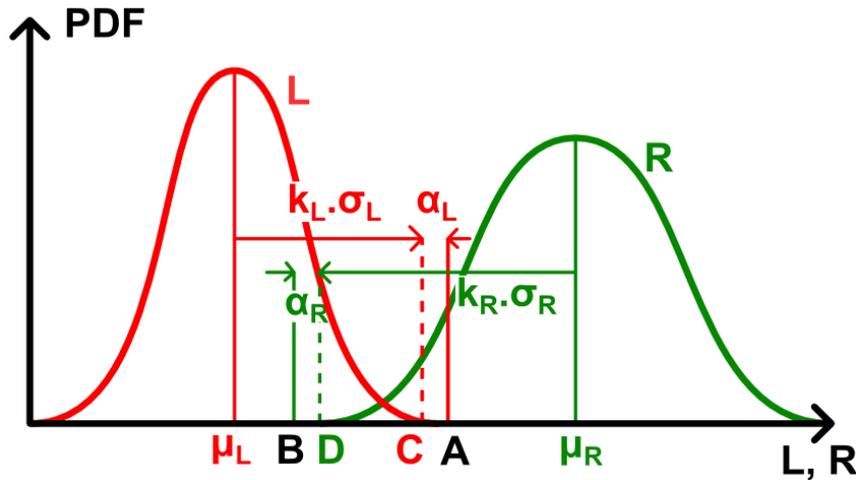
ACB – Lignes directrices – Stabilité au glissement

Combinaisons de charges			
FS_{Det}	Usuelles	Inhabituelles	Extrêmes
Résistance au pic (sans essai de matériaux)	3.0	2.0	1.3
Résistance au pic (avec essais de matériaux)	2.0	1.5	1.1
Résistance résiduelle (friction)	1.5	1.3	1.1

. Quels types d'incertitudes sont reliés à $FS_{Det} = 3.0$?

Types d'incertitudes	Nature des incertitudes	Paramètre
Physiques	Variations des sollicitations (L), variations inhérentes des matériaux (résistance R);	c (coefficient de variation)
Statistiques	Variations influencées par les activités humaines : confiance dans les observations, essais, investigations, contrôle de qualité...	k (bornes des lois de probabilités PDF)
Epistémiques (modèle)	Conséquences des hypothèses et approximations dans les modèles de calculs	<u>α</u>
	Connaissance incomplète, ignorance	f_i

Incertitudes – Lois de probabilités (PDF) – FS_{Det} vs AFS



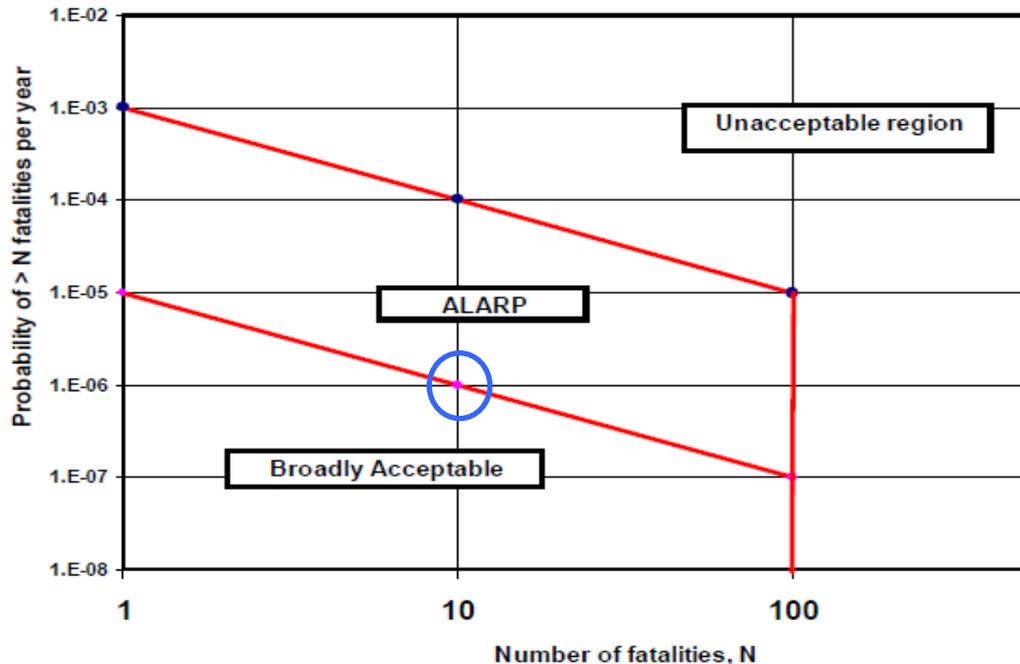
- **PDF** – "Probability Density Function" pour **L (solllicitations)** et **R (résistance)**
- Normale, Lognormale, Gumbel ...
- Moyenne **m**, Écart type, **s**
- Coefficients de variation, **c = s/m**
- **k** (incertitudes statistiques)
- **α** (incertitudes épistémiques)
- **φ** (coefficient de combinaison de charges)
- **f_i** (facteur humain, souvent =0)

$$FS_{Det} = m_R / m_L \text{ (fissuration moyenne)}$$

$$AFS = FS_{Det} \{ 1 - (k_R \cdot c_R + \alpha_R) \} / \phi \{ 1 + (k_L \cdot c_L + \alpha_L) \}$$

Incertitudes	Nature des incertitudes	Paramètres
Physiques	Variations sollicitations L et résistance R ;	c_L, c_R
Statistiques	Variations influencées par les activités humaines	k_L, k_R
Modèles	Approximations dans les modèles	α_L, α_R

Fiabilité cible ($1 - P_f^*$) – PRINCIPE "ALARP"

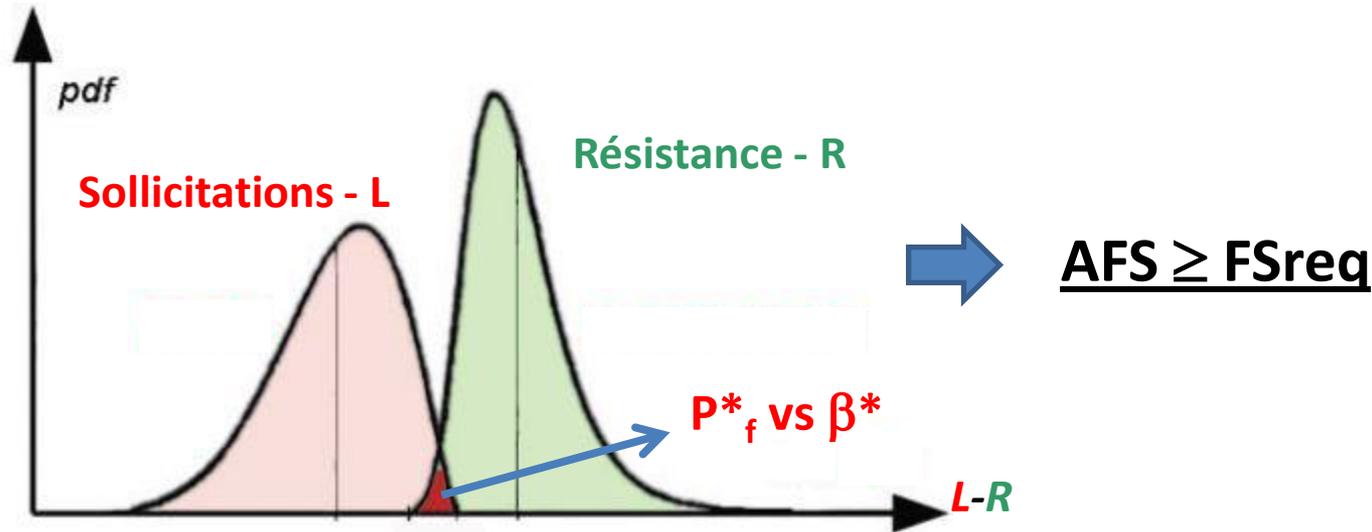


ACB – "Norme"
 Critère de sûreté
 acceptable
 socialement

Indice de Fiabilité Cible, β^* (ex. 4.75), (Probabilité de défaillance $P_f^* = 10^{-6}$)

Qualité du suivi – niveau de connaissance	Possibilité d'observations / évolution de la défaillance	
	Élevée / lente (ductile)	Mauvaise / fragile
Élevée	3.7 (10^{-4})	4.2 (10^{-5})
Moyenne	4.2 (10^{-5})	4.75 (10^{-6})
Faible	4.75 (10^{-6})	5.2 (10^{-7})

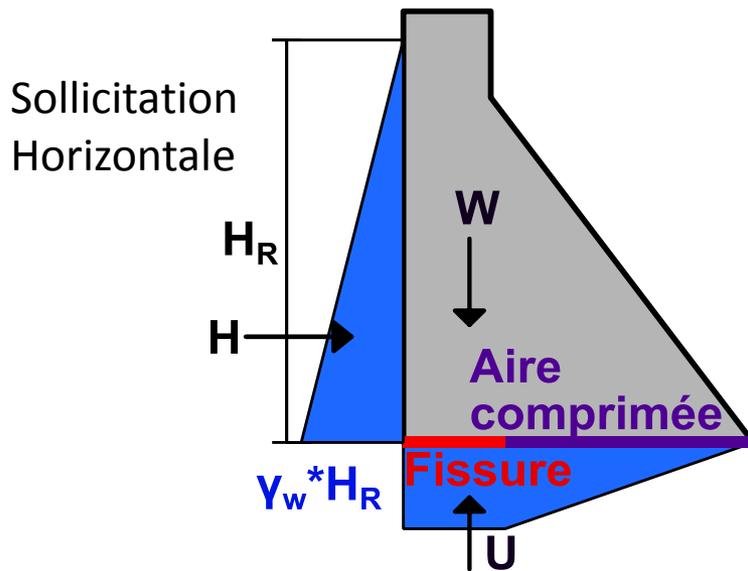
AFS versus critère de fiabilité requis FSreq



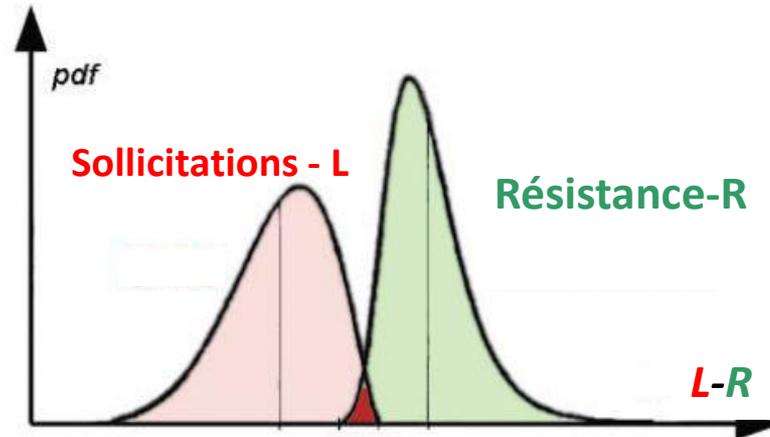
- FSreq est le critère de fiabilité requis. En remplacement de FS_{Det} (ex. 3.0), un indice de sûreté socialement acceptable est utilisé (P^*_f ou β^*).
- Cet indice de sûreté est une probabilité de défaillance tolérable P^*_f (\approx zone rouge), ce qui correspond à un indice de fiabilité minimal β^* (probabilité de survie).
- P^*_f ou β^* peuvent être choisis à partir de guides, codes, systèmes de classification du risque qui considèrent la sévérité des conséquences d'une rupture.
- Dans l'équation $AFS \geq FSreq$, FSreq est calculé de sorte que le chevauchement des lois de probabilité (\approx zone rouge) corresponde à la valeur cible P^*_f ou β^* .

Construction des lois de probabilités pour (L) and (R)

Objectifs: approche simplifiée à 2 variables + calculs symboliques



Force verticale
 $V = (W-U)$



• **L (Sollicitations);** $L = H = \frac{1}{2} \gamma_w h_w^2$; (kN)

• **R (Résistance);** $R = V \tan \phi + C A_c$; (kN)

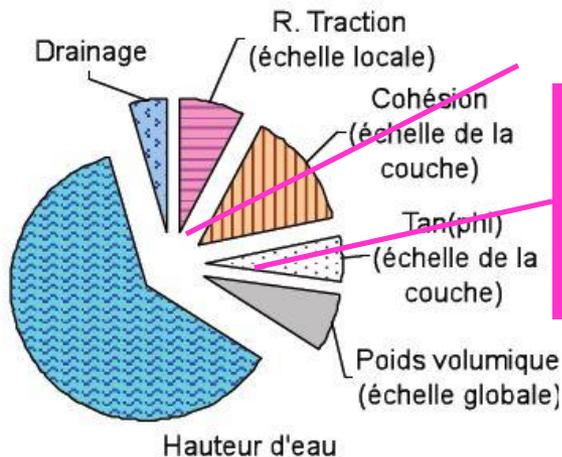
• Écart type de la résistance, s_R selon, $\sigma_{\tan \phi}$ et σ_c :

$$\sigma_R = [(V \cdot \sigma_{\tan \phi})^2 + (A_c \cdot \sigma_c)^2]^{0.5}$$

• **3** variables aléatoires (**H**, **$\tan \phi$** , **C**) sont réduites à **2** variables aléatoires de base (**L** et **R**)

• $FS_{Det} = m_R / m_L$ CADAM; AFS ; FSreq , (Calculs symboliques)

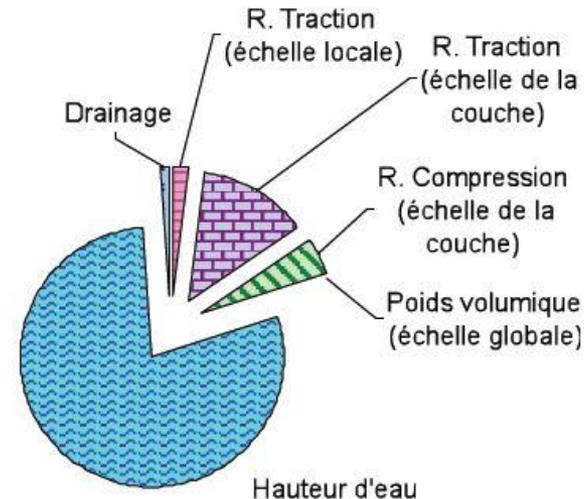
Analyse « Classique »



Monte-Carlo

b = 5.82

Analyse « Avec couplage »



Monte-Carlo – tirages conditionnés

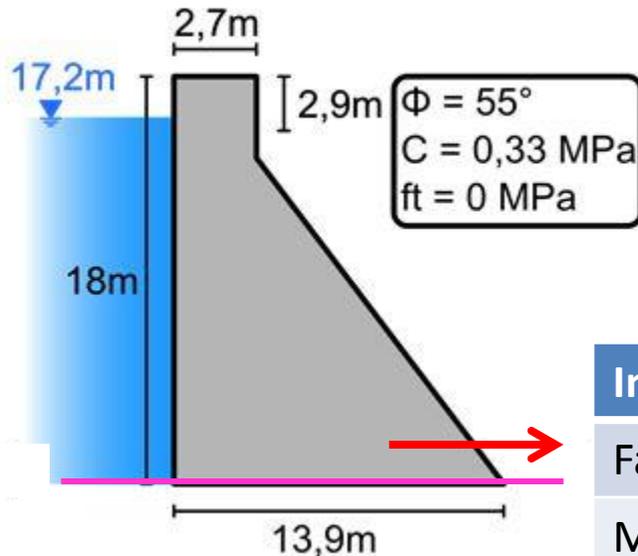
b = 5.56

Matériaux R au cisaillement

Hauteur d'eau (**H**) prédomine lorsque l'on tient compte du couplage au niveau des matériaux; enveloppe de rupture ($s'_n, f_t, f'_c, \tan \phi$) $\rightarrow t$; **le couplage (L, R) au niveau de la fissuration est toujours présent dans les 2 types d'analyse**

Méthode AFS – suggestions pour les paramètres d'incertitudes ($c_L, c_R ; k_L, k_R ; \alpha_L, \alpha_R$) et FSreq pour différentes lois de probabilités de **L** et **R**

Publication : Kreuzer, H., Léger, P. 2013, "The adjustable factor of safety: A reliability-based approach to assess the factor of safety for concrete dams", Hydropower & Dams, Issue 1. (BP glissement – B Voûte fissuration)



- **L** = loi Lognormale (ex.) (crue 1000 ans; $\phi = 0.65$)
- **R** = loi Lognormale
- Catégorie de risque faible : $\beta^* = 4.25$ ($P_f^* = 10^{-5}$),
- Méthode de gravité $\alpha_L = 0.10$ and $\alpha_R = 0.05$

$$FS_{Det} = m_R / m_L \text{ (fissuration moyenne)}$$

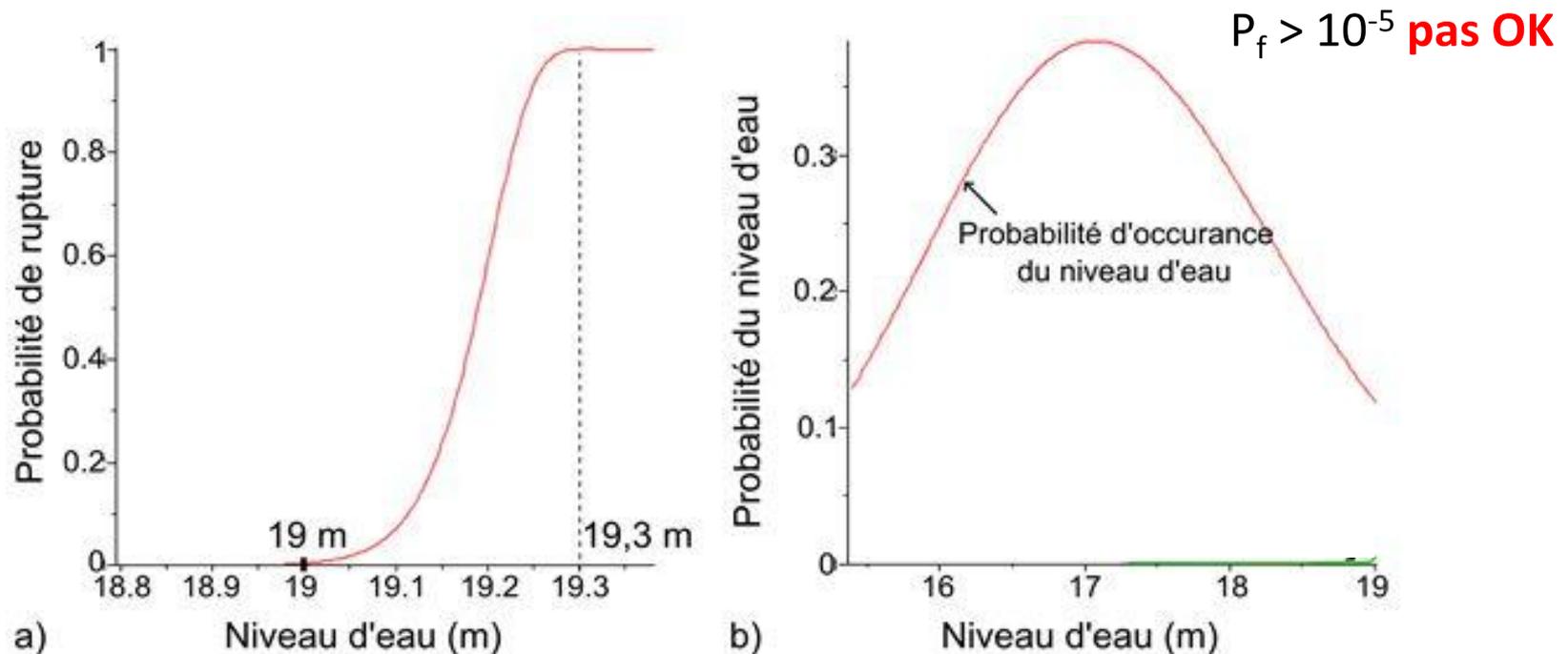
Incertitudes	FS _{det}	AFS	FS _{req} (10 ⁻⁵)
Faibles	5.14	3.86	1.93 (OK)
Moyennes	5.14	1.89	2.65 (pas OK)
Élevées	5.14	< 1	-

Monte-Carlo (fissuration exacte); incertitude moyenne $P_f = 2.12 \times 10^{-5} > 1.0 \times 10^{-5}$

(pas OK) 11/13

Méthode de Fragilité – Objectifs 2 variables aléatoires **R** et **L** ; couplage entre **R** et **L** ; solution "analytique"

Probabilité conditionnelle de défaillance intégrée sur le domaine de probabilité de **L**
 $Fr(x) = P [LS | L]$; $Fr(x)$ = fragilité, **LS** = état limite (glissement), **L**=solicitation
 $P_f = P [LS] = \int P [LS | L] P[L]$; $P[L]$ Probabilité de la **solicitation**. **$P_f = 2.66 \times 10^{-5}$**



Fragilité = Résultats analytiques consistant avec Monte-Carlo (fissuration exacte); et AFS (valeur moyenne de fissuration)

CONCLUSIONS

- La méthode du **Facteur de Sécurité Adaptable (AFS)** est une approche **simplifiée L-R** (analytique) qui permet la prise en compte rationnelle des incertitudes; le critère d'acceptabilité (FS_{req}) est fonction des incertitudes de **L** et **R** et de la fiabilité requise $1 - P_f^*$ (ou b^*).
- La méthode AFS utilise les **moyennes** des variables **L** et **R** pour établir un coefficient de sécurité FS_{det} (fissuration moyenne) qui est par la suite "**adapté**" en fonction des incertitudes (pour cet ajustement, on suppose **L** et **R** non couplées).
- La méthode AFS pour le glissement des barrages-poids comporte des approximations, mais le statut sécuritaire ou non d'un barrage est consistant avec la méthode numérique de Monte-Carlo ou les analyses analytiques de fragilité (avec fissuration exacte).
- La méthode du **Facteur de Sécurité Adaptable**, basée sur les principes de fiabilité, est donc simple à mettre en oeuvre pour le développement de lignes directrices à caractère "fiabiliste" pour la sécurité des barrages (poids, voûtes ...).