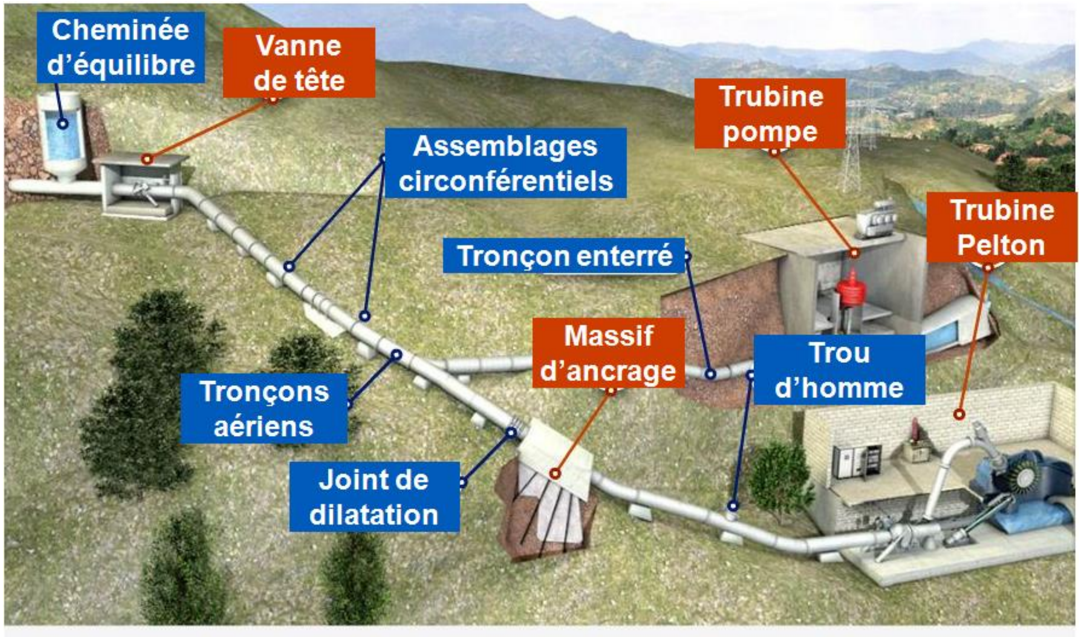
FIABILITÉ DES CONDUITES FORCÉES EN SERVICE D'EDF:

OPTIMISATION DES DIAGNOSTICS MÉCANIQUES AVEC OPENTURNS

Emmanuel ARDILLON (EDF/R&D)
Philippe BRYLA (EDF/DTG)
Antoine DUMAS (PHIMECA)

15 juin 2018

LES CONDUITES FORCÉES À EDF



EDF exploite plus de 450 usines hydroélectirques

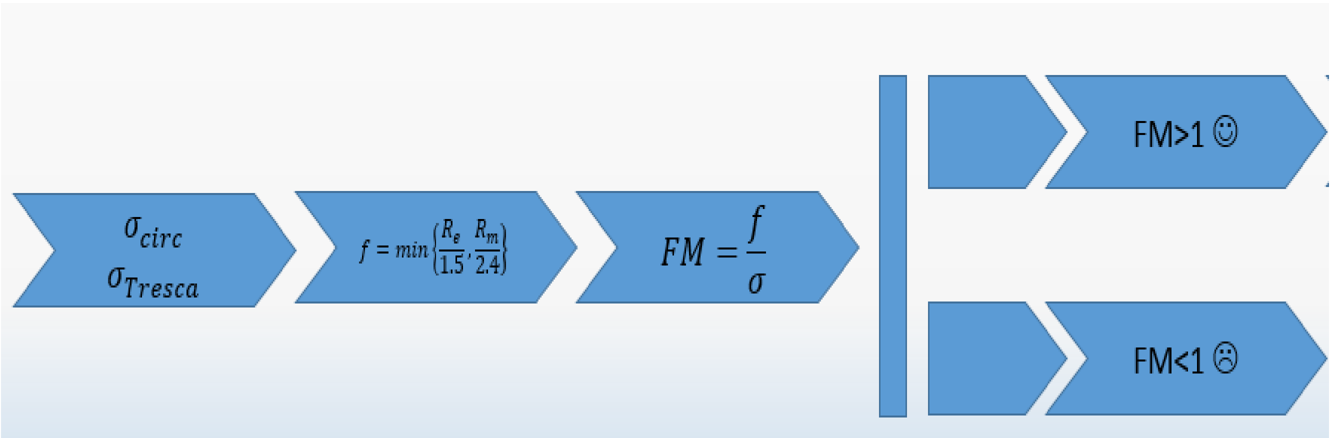
Elles sont alimentées par plus de 250 km de conduites forcées (CF) – Age moyen > 50 ans

CFs soumises au risque de défaillance par instabilité plastique
corrosion généralisée (interne et externe)

Nécessaire de justifier leur intégrité mécanique → DIAGNOSTICS
inspections, mesures (épaisseur, materiau)
calcul d'un facteur de marge déterministe FM

$$MF = \frac{f}{\sigma_C}$$

PRINCIPE DE L'ÉVALUATION DÉTERMINISTE



$$f_1(R_e; R_m) = min\left(\frac{R_e^d}{1{,}5}; \frac{R_m^d}{2{,}4}\right)$$

$$f_2(R_e; R_m) = min\left(\frac{R_e^d}{1{,}6}; \frac{R_m^d}{2{,}7}\right)$$

La CF est apte au service dès lors que FM ≥ 1 sur chaque tronçon

FM couvre les incertitudes de manière imprécise: cumul de pénalisations arbitraires

Parmi ces conservatismes, les quantiles suivants:

Limite à la rupture: $R_m{}^d = \mu_{Rm} - \gamma_{Rm} \cdot \sigma_{Rm}$

Perte d'épaisseur: $\Delta e^d = \mu_{\Delta e} - \gamma_{\Delta e} \cdot \sigma_{\Delta e}$

Conventionnellement, les multiplicateurs γ sont pris égaux à 2.

CE CHOIX EST-IL PERTINENT?

PEUVENT-ILS ETRE OPTIMISES?

MÉTHODOLOGIE

L'approche probabiliste intègre toute l'information disponible et permet un traitement rigoureux des incertitudes

A satisfying and appropriate level of conservatism is targeted

Les multiplicateurs γ sont calibrés pour viser un niveau de fiabilité satisfaisant ($P_f^{target} = 10^{-7}$ / an)

→ Approche semi-probabiliste:
Le format d'évaluation reste déterministe mais les paramètres sont calibrés d'après des calculs probabilistes

BS-7910

Target failure probability (events/year)

Failure consequences	Redundant component	Non-redundant component
Moderate	2.3×10^{-1}	10^{-3}
Severe	10^{-3}	7×10^{-5}
Very severe	7×10^{-5}	10^{-5}
Extremely severe	10^{-5}	10^{-7}

For a given P_f^{target}

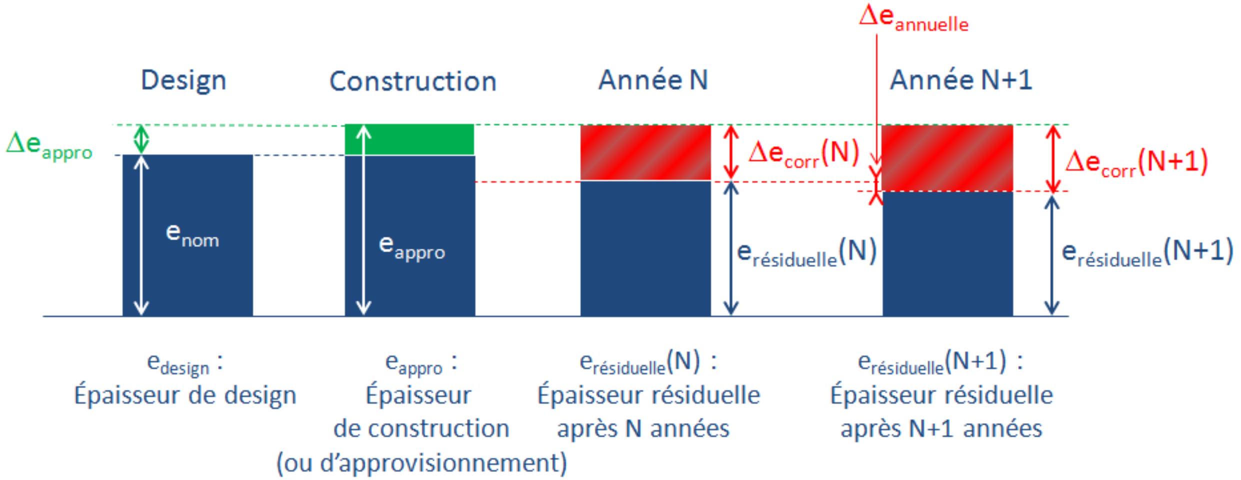
For a given joint distribution (R_m, Δe, ε) (corresponding to the calculation cases defined in §2.4)

MF = 1
μ_ε
e_{nom}

Results:
A unique (γ_{Rm}, $\gamma_{\Delta e}$) = γ . (1 ; 1) such that $P_f(\gamma) = P_f^{target}$

VARIABLES D'ENTRÉE: L'ÉPAISSEUR RÉSIDUELLE

- 2 facteurs expliquent l'écart entre **épaisseur réelle** et **nominale** :
  - La surépaisseur d'approvisionnement : $\boldsymbol{\Delta e_{appro}}$
  - La perte d'épaisseur due à la corrosion : $\boldsymbol{\Delta e_{corr}}$



- Prise en compte d'un majorant de la perte d'épaisseur annuelle par corrosion : $\boldsymbol{\Delta e_{annuelle} = 100}$ **µm/an**
  (cinétiques constatées en l'absence de revêtement généralement comprises entre 10 µm/an et 50 µm/an)

⇨ Épaisseur résiduelle à l'année N : $\mathbf{e(N) = e_{nom} + \underbrace{\Delta e_{appro} - \Delta e_{corr}}_{\Delta e}}$

⇨ Épaisseur résiduelle à l'année N+1 : $\mathbf{e(N+1) = e(N) - \Delta e_{annuelle}}$

VARIABLES D’ENTRÉE: LES CARACTÉRISTIQUES DE L’ACIER

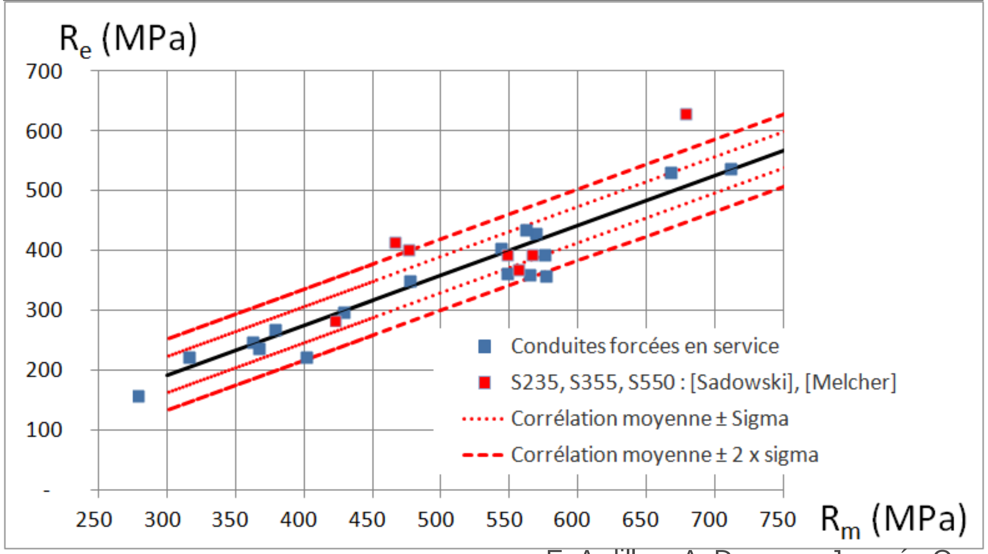
- Analyse menée sur un grand nombre de conduites forcées :
  - R_e et R_m généralement distribués selon une loi normale ou lognormale, avec : **$CV(R_e) \leq 10\%$, $CV(R_m) \leq 10\%$** et $CV(R_e) > CV(R_m)$
  - Pour une nuance d’acier donnée, la dispersion sur R_e sachant R_m peut être décrite par : **$\omega = CV(R_e|R_m)$**, avec **$\omega \leq 5\%$**
  - Sur un tuyau donné, la relation R_e-R_m est modélisée par la relation :

$$\mathbf{R_e = A \times R_m - B + \varepsilon}$$

$\mu(\varepsilon)$: écart par rapport à la corrélation générale

$\sigma(\varepsilon) = \omega \times \mu(R_e)$: dispersion de R_e, connaissant R_m sur une nuance donnée

Corrélation générale : $\mu_{Re} = A \times \mu_{Rm} - B$



LES ÉQUATIONS DU MODÈLE

- Critère de ruine basé sur le dépassement de la contrainte d'écoulement plastique (BS-7910:2013 annexe G) : $\sigma_f = \dfrac{R_e + R_m}{2}$
- Fonction d'état limite écrite sous une forme adimensionnée ne faisant plus intervenir le rayon du tuyau ni la pression de service :

Contrainte d'écoulement σ_f

Contrainte admissible **f**

À l'année N : $$\frac{R_e(\varepsilon) + R_m}{2} - \frac{min\left(\frac{R_e^{calcul}}{1,5} ; \frac{R_m^{calcul}}{2,4}\right)}{FM_N} \cdot \frac{e_{nom} + \Delta e_{calcul}}{e_{nom} + \Delta e_{appro} - \Delta e_{corr}} < 0$$

À l'année N+1 : $$\frac{R_e(\varepsilon) + R_m}{2} - \frac{min\left(\frac{R_e^{calcul}}{1,5} ; \frac{R_m^{calcul}}{2,4}\right)}{FM_N} \cdot \frac{e_{nom} + \Delta e_{calcul}}{e_{nom} + \Delta e_{appro} - \Delta e_{corr} - \Delta e_{annuelle}} < 0$$

Valeurs de calcul :

$$R_m^{calcul} = \mu_{Rm} - \gamma \cdot \sigma_{Rm}$$

$$\Delta e^{calcul} = \mu_{\Delta e} - \gamma \cdot \sigma_{\Delta e}$$

Variables aléatoires :
(Lois normales)
Δe_{appro}, Δe_{corr},
R_m, ε

Perte d'épaisseur supplémentaire sur 1 an

L'ESTIMATION DES PROBABILITÉS DE DÉFAILLANCE

- On estime la probabilité que le tuyau soit non défaillant à l'année N et défaillant à l'année N+1

$$\boxed{\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{annuelle}} = \boldsymbol{P}(\{\mathrm{G}(\Delta\mathrm{e}, \mathrm{R_m}, \varepsilon) \geq 0\} \cap \{\mathrm{G}(\Delta\mathrm{e} - \Delta\mathrm{e}_{\mathrm{annuelle}}, \mathrm{R_m}, \varepsilon) < 0\})} \quad \mathbf{(E_1)}$$

- La fonction d'état limite étant strictement décroissante en fonction du temps, cette probabilité peut s'écrire plus simplement :

$$\boxed{\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{annuelle}} = \boldsymbol{P}(\mathrm{G}(\Delta\mathrm{e}, \mathrm{R_m}, \varepsilon) \cdot \mathrm{G}(\Delta\mathrm{e} - \Delta\mathrm{e}_{\mathrm{annuelle}}, \mathrm{R_m}, \varepsilon) < 0)} \quad \mathbf{(E_2)}$$

- Estimation des probabilités de défaillance (γ=2)
  - Logiciel OpenTURNS® (V1.8rc1): FORM système **(E_1)** ou FORM **(E_2)** + tirages d'importance
    - Besoin de méthodes d'évaluation de probabilité système (événements combinés - chantier 2018)
  - Quelques vérifications croisées concluantes avec le logiciel SYSREL® (SORM)
- « Optimisation » des γ
  - Pour chaque configuration, recherche d'un γ_{opt} identique pour R_m et Δe
  - Recherche de γ_{opt} dans l'intervalle [0; 2,5]
  - Recherche de zéros ($P_f = 10^{-7}$): OT-NLopt, méthode de Brent
  - Utilisation d'une fonction de pénalisation du type « moindres carrés »

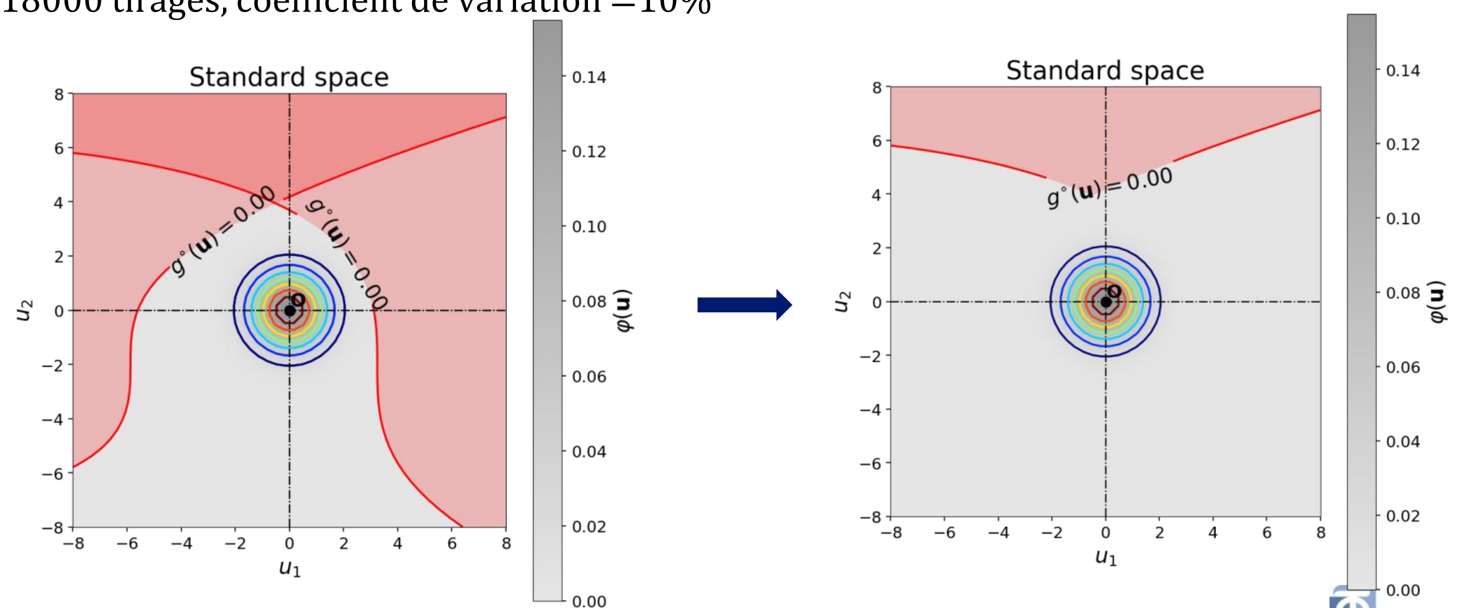
PROBABILITÉ D'INTERSECTION D'ÉVÉNEMENTS

- Formulation de la probabilité

$$p_f = P\left(\bigcap_{i=0}^{N} g_i(\boldsymbol{X}) < 0\right)$$

  - où g_i sont les fonctions de performances.

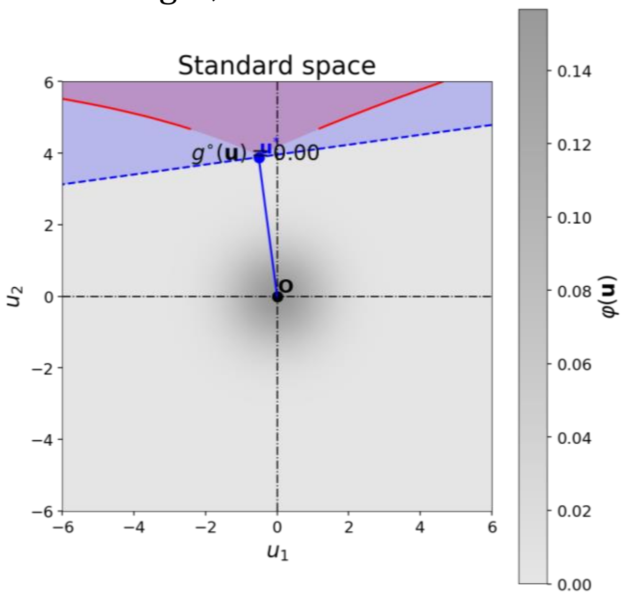
- Exemple en 2 dimensions avec 2 fonctions de performance :
  - $p_{f,Monte\ Carlo} = 1{,}235 \times 10^{-5}$
  - 818000 tirages, coefficient de variation =10%

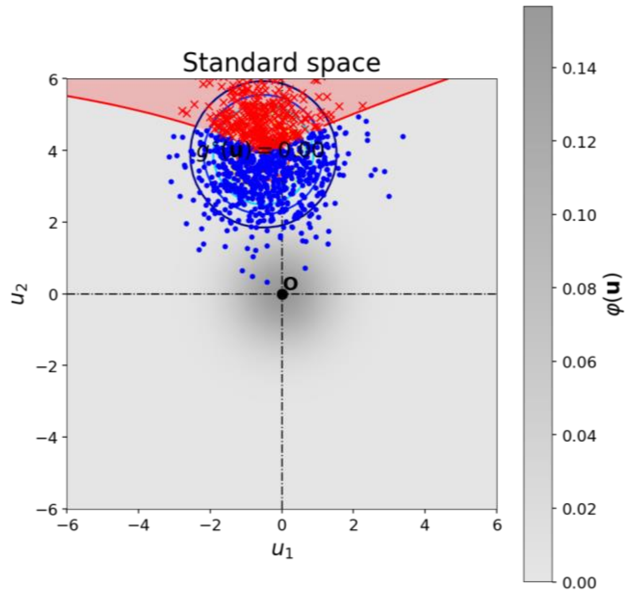


CALCUL DE LA PROBABILITÉ SYSTÈME

- **Méthode de calcul préférentielle basée sur FORM et tirages d'importance**

1. Création d'une fonction composite $g_c(\boldsymbol{X}) = \max(\{g_i(\boldsymbol{X})\})$
   - Evaluation de la probabilité suivante $p_f = P(g_c(\boldsymbol{X}) < 0)$
   - Méthode FORM classique + tirages d'importance
   - $P_{f,IS} = 1{,}42 \times 10^{-5}$
   - 970 tirages, coefficient de variation =10%





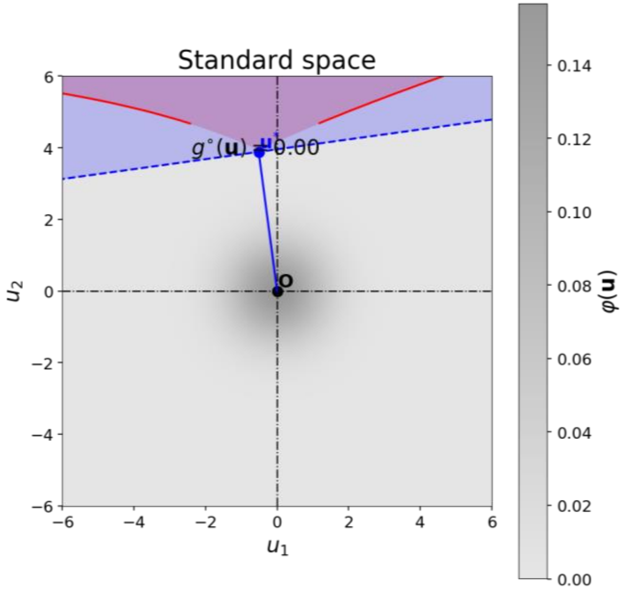
   - Problème : l'algorithme de recherche du point P* peut ne pas converger à cause de la complexité de la fonction composite.

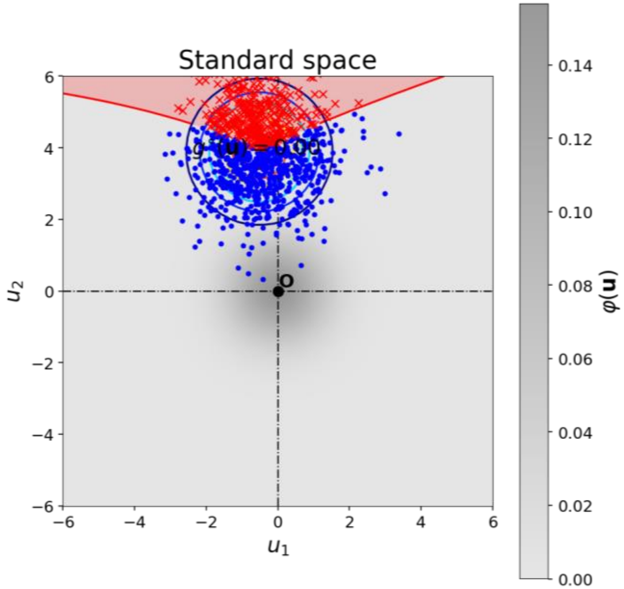
CALCUL DE LA PROBABILITÉ SYSTÈME

2. FORM augmenté
   - Résolution du problème d'optimisation

$$\min \quad \sum_i u_i^2$$
$$sous \quad \{g_i(U) = 0\}_{i=1,\dots,N}$$

   - $P_{f,IS} = 1{,}42 \times 10^{-5}$
   - 970 tirages , coefficient de variation =10%

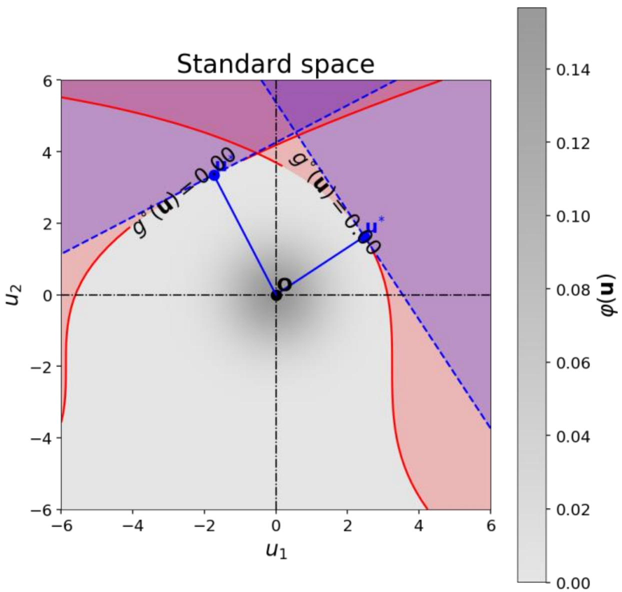


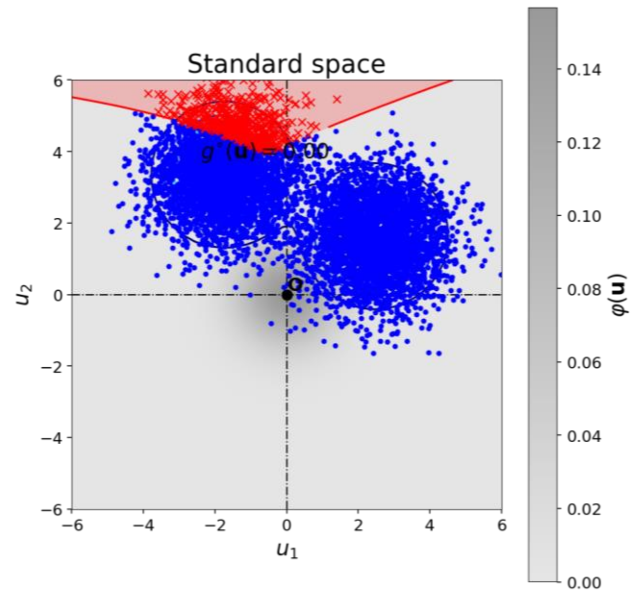


   - Problème : l'algorithme de recherche du point P* peut ne pas converger

CALCUL DE LA PROBABILITÉ SYSTÈME

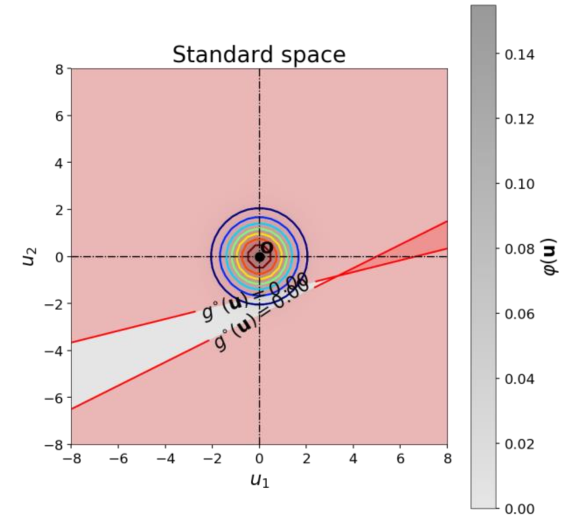
3. FORM système
   - FORM simple sur chaque fonction de performance puis tirages d'importance centrés sur chaque point P*.
   - FORM système : $p_{f,FORM\ systeme} = P\left(\bigcap_{i=0}^{N} g_i(\boldsymbol{X}) < 0\right) = \Phi_N(-\boldsymbol{\beta}, [\rho]) = 4{,}21 \times 10^{-7}$
   - $P_{f,IS} = 1{,}42 \times 10^{-5}$
   - 6530 tirages , coefficient de variation =10%



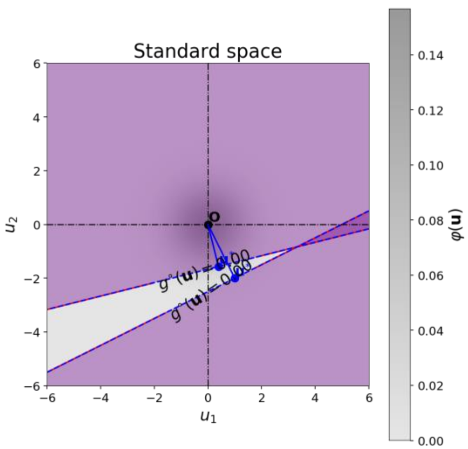


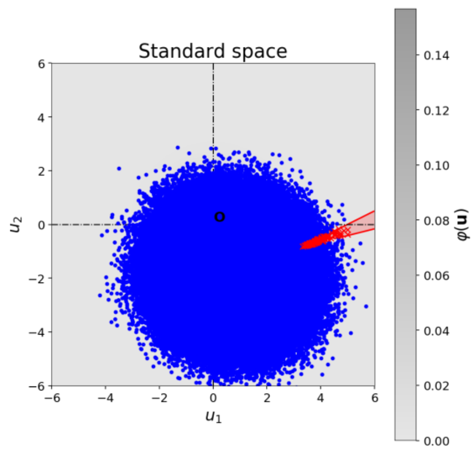
   - Problème : suivant la position des état-limites entre eux, les tirages peuvent ne pas être centrés au bon endroit.

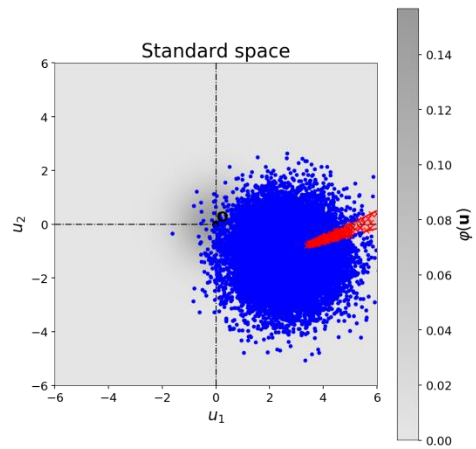
CALCUL DE LA PROBABILITÉ SYSTÈME



- Exemple avec une intersection loin des points P*
  - $p_{f_{reference}} = 9 \times 10^{-6}$
  - Tirages d'importances centrés sur les 2 points P* :
    - $P_{f,IS} = 1{,}1 \times 10^{-5}$
    - 1 074 000 tirages , coefficient de variation =10%
  - Tirages d'importance centrés sur le point intersection
    - $P_{f,IS} = 9{,}1 \times 10^{-6}$
    - 17 580 tirages , coefficient de variation =10%







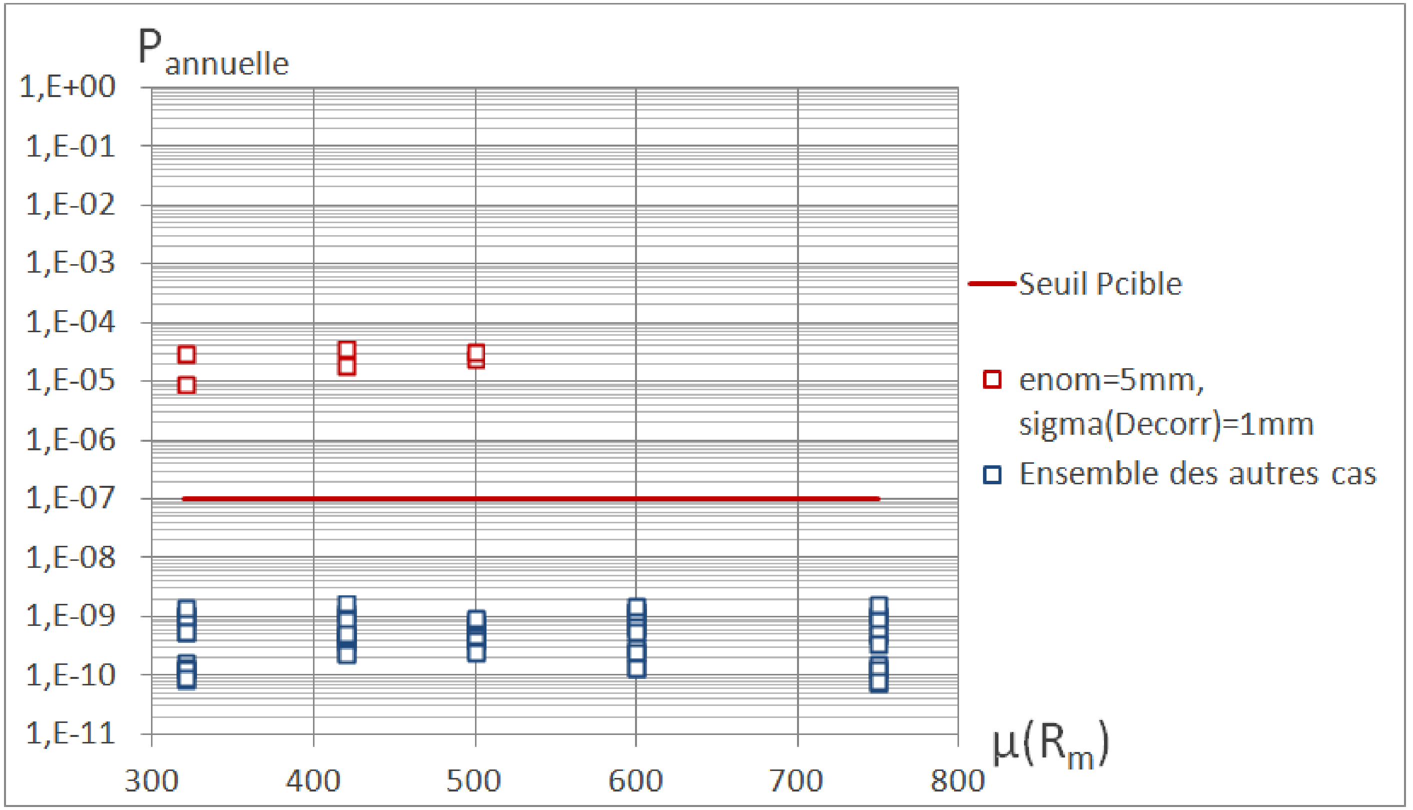
  - La probabilité sur les conduites correspondent à ce cas.

LE PLAN D'EXPÉRIENCE MIS EN ŒUVRE

- Modélisation de plus de 700 combinaisons de paramètres couvrant la plupart des configurations de Conduites Forcées :
  - **Résistance moyenne R_m :** $320\ \text{MPa} \leq \mu_{Rm} \leq 750\ \text{MPa}$
  - **Coef. de variation de R_m :** $2\% \leq CV_{Rm} \leq 10\%$
  - **Épaisseur nominale :** $5\ \text{mm} \leq e_{nom} \leq 30\ \text{mm}$
  - **Écart-type de Δe_{corr} :** $0{,}25\ \text{mm} \leq \sigma_{\Delta e} \leq 1\ \text{mm}$
  - **Coef. de variation ω de $R_{p0,2}$ sachant R_m** : $2\% \leq \omega \leq 5\%$
  - **Cinétique de corrosion** : $\Delta e_{annuelle} = 100\ \mu\text{m/an}$
- 3 cas de figure pour la relation **$\mu(R_e) = A.\ \mu(R_m) - B + \mu_\varepsilon$** :
  - Corrélation moyenne : $\mu_\varepsilon = 0$
  - Matériau « au-dessus » de la corrélation moyenne : $\mu_\varepsilon = +\ 30\ \text{MPa}$
  - Matériau « au-dessous » de la corrélation moyenne : $\mu_\varepsilon = -\ 50\ \text{MPa}$

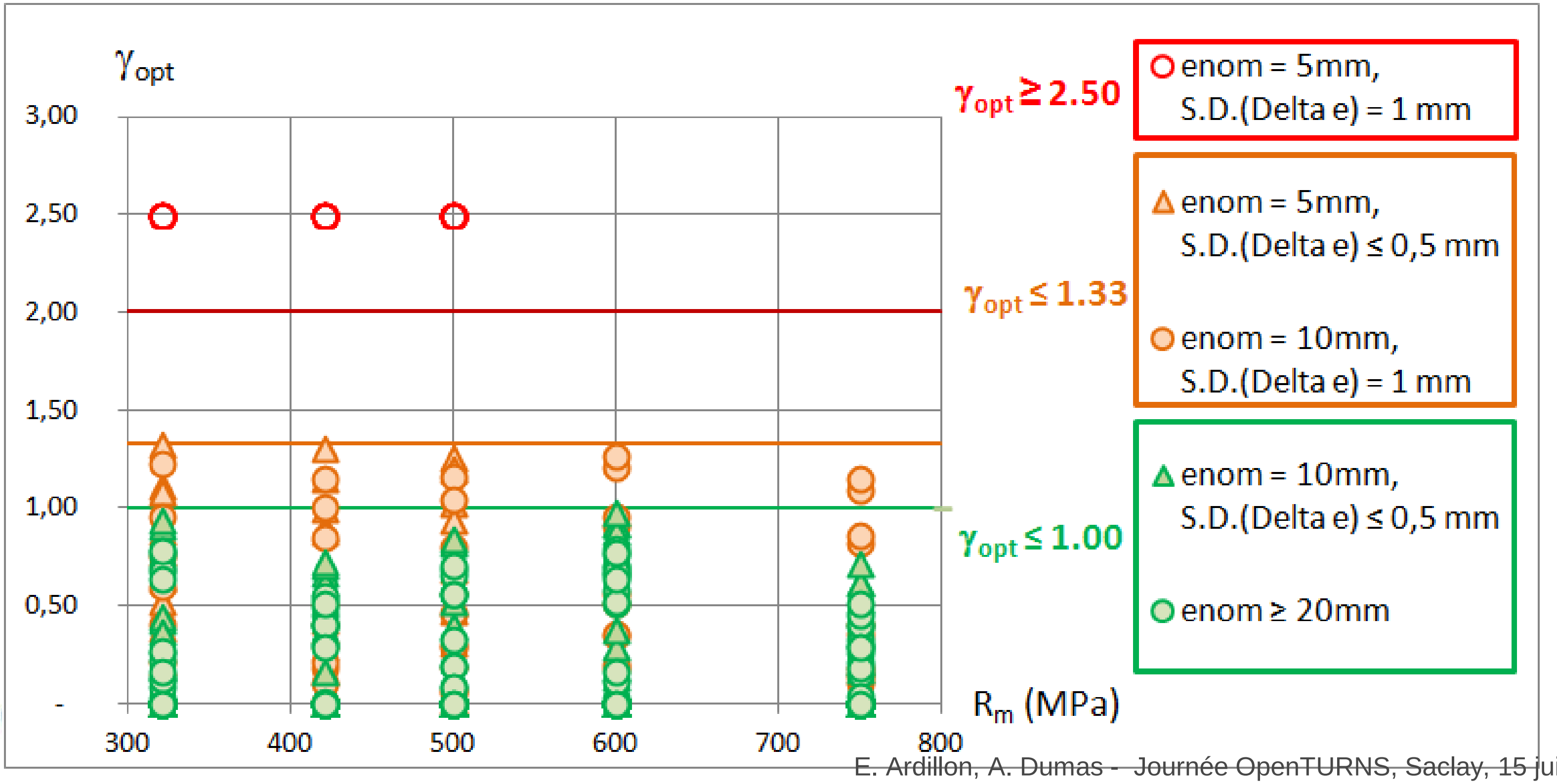
ESTIMATION DES PROBABILITÉS DE RUINE POUR FM=1

- Probabilité annuelle estimée avec γ **= 2** (pratique actuelle) avec les combinaisons les plus sévères (CV_{Rm}=10%, ω = 5%)
  - Dans la plupart des cas : $P_{annuelle} \leq 10^{-9}$
  - Quelques cas conduisent à $P_{annuelle}$ au-dessus de P_{cible} : lorsque l'épaisseur nominale est faible (5 mm) et l'écart-type de Δe_{corr} élevé



« OPTIMISATION » DES VALEURS DE CALCUL

- On choisit le multiplicateur d'écart-type γ pour que $P_{annuelle}$ reste inférieure ou égale à P_{cible} lorsque FM=1 (avec $P_{cible} = 10^{-7}$ / an)
- Sur l'ensemble des cas simulés :
  - ⇨ $\gamma_{opt} < 1$ dans la majorité (92%) des cas
  - ⇨ $\gamma_{opt} < 1{,}33$ dans quelques cas (3%) plus sévères
  - ⇨ $\gamma_{opt} > 2{,}50$ dans des cas avec très faibles épaisseurs et Δe très dispersée



BORNES SUP DE Γ_{OPT} POUR CERTAINS GROUPES DE CFS

Selon μ_{Rm}:

Pour μ_{Rm} = 600 MPa, la borne sup de γ_{opt} (γ_{opt}^{sup}) est égale à 1,28;

Pour μ_{Rm} = 750 MPa, la borne sup de γ_{opt} (γ_{opt}^{sup}) est égale à 1,10.

cv_{Rm} n'est pas un paramètre influent

Selon e_{nom}:

e_{nom}	$e_{nom} \geq$ 10 mm	e_{nom} = 10 mm	e_{nom} = 20 mm	e_{nom} = 30 mm	$e_{nom} \geq$ 10 mm $\cap$ μ_e = 30 MPa	$e_{nom} \geq$ 10 mm $\cap$ $\sigma_{\Delta e} \neq$ 1mm
γ_{opt}^{sup}	1,27	1,27	0,80	0,71	0,96	0,98

Selon $\sigma_{\Delta e}$

$\sigma_{\Delta e}$	$\sigma_{\Delta e}$ = 1mm	$\sigma_{\Delta e}$ = 0,5 mm	$\sigma_{\Delta e}$ = 0,25 mm	$\sigma_{\Delta e} \leq$ 0,5 mm $\cap$ $cv_{Rm} \leq$ 0.05
γ_{opt}^{sup}	2,5	1,27	1,11	0.77

QUELQUES COMPLÉMENTS D'ÉTUDE

1. Analyse de sensibilité de la probabilité de ruine en fonction de la valeur du Facteur de Marge : entre 0,90 et 1,20

- On étudie le ratio : $r = P_{annuelle}(FM) / P_{annuelle}(FM=1)$

2. Analyse de l'impact d'une épreuve hydraulique initiale sur la probabilité de défaillance :

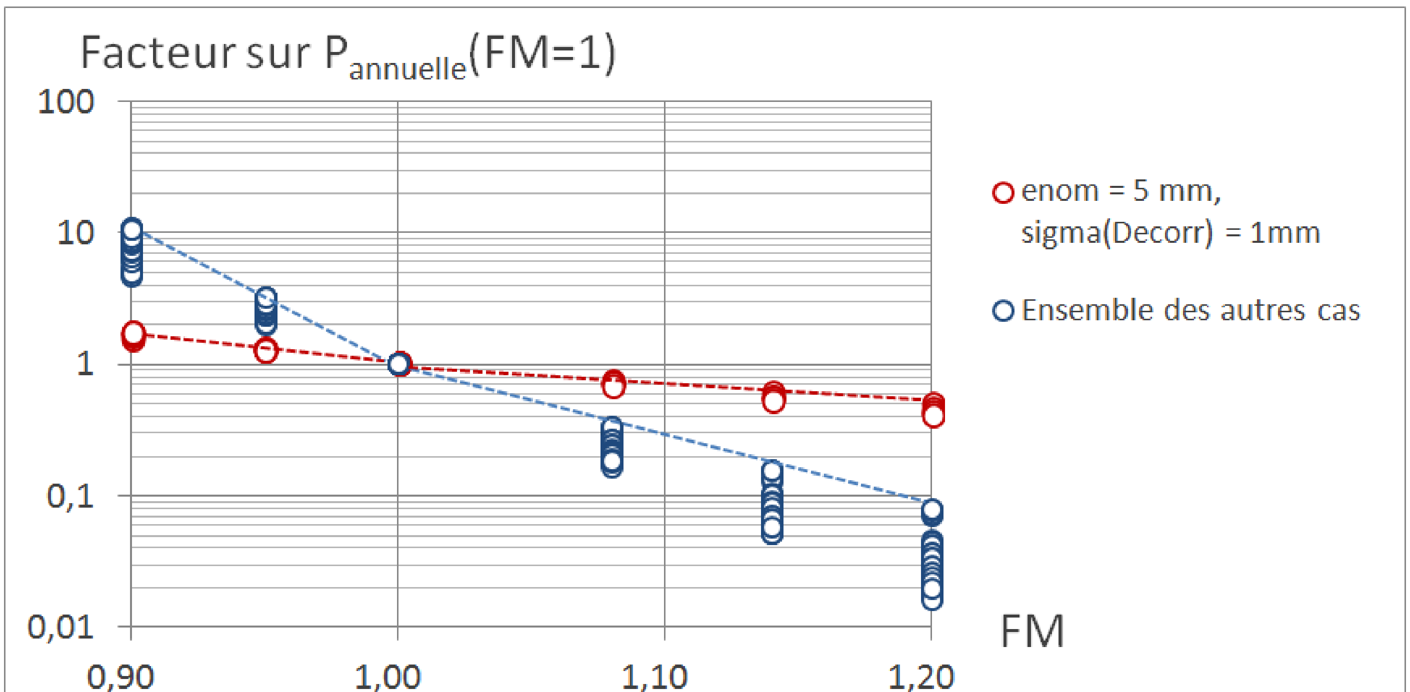
- Est-il possible de prendre une contrainte admissible compte tenu de la réduction implicite des incertitudes résultant de l'information suivante :
  « les tuyaux ont résisté à $P_{épreuve}$ = k x P » (par exemple k= 2) ?
- Dans ce cas, on cherche à estimer la probabilité conditionnelle suivante :

$$\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{annuelle}}^{\boldsymbol{conditionnelle}} = \boldsymbol{P}\left(\begin{array}{c} \left\{G\left(P, \Delta e_{nom} + \Delta e_{appro} - \Delta e_{corr}, R_m, \varepsilon\right) \geq 0\right\} \\ \cap \left\{G\left(P, \Delta e_{nom} + \Delta e_{appro} - \Delta e_{corr} - \Delta e_{annuelle}, R_m, \varepsilon\right) < 0\right\} \\ \mid \left\{G\left(P_{épreuve}, \Delta e_{nom} + \Delta e_{appro}, R_m, \varepsilon\right) \geq 0\right\} \end{array}\right)$$

- Les simulations montrent que le calcul de cette probabilité n'est pas toujours possible : la recherche de l'intersection des surfaces d'état limite pose parfois problème

COMMENT ÉVOLUE LA PROBABILITÉ DE RUINE EN FONCTION DU FACTEUR DE MARGE ?

- **Lorsque FM = 0,90 :**
  - ⇨ Risque nominal de ruine **multiplié par un facteur ≤ 10**
- **lorsque FM = 1,20 :**
  - ⇨ Risque nominal **divisé par 10** (au moins) dans la plupart des cas
  - ⇨ Risque nominal **divisé par 2** (au moins) si e_{nom}= 5 mm et $\sigma_{\Delta e}$ = 1 mm



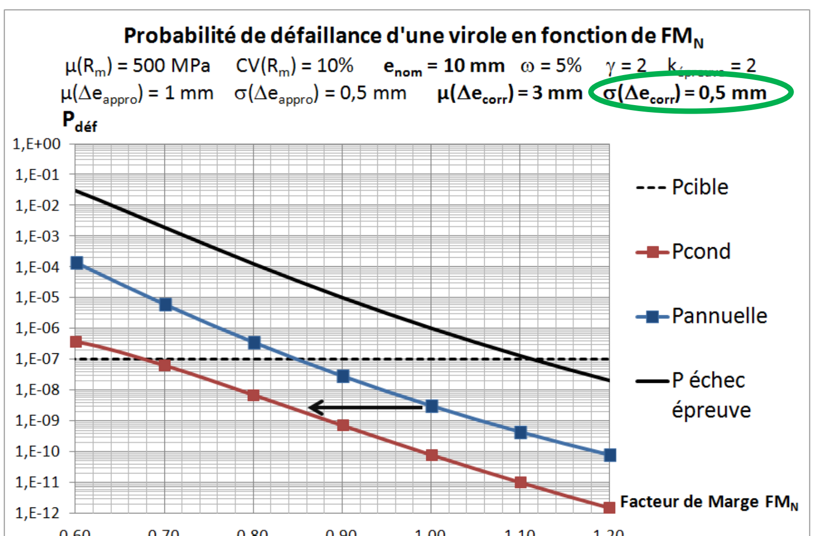
EFFET DE L'ÉPREUVE HYDRAULIQUE

- 3 cas sont possibles pour la probabilité conditionnelle de défaillance :
  1. L'épreuve initiale est informative et décale la courbe $P_{annuelle} = f(FM_N)$ vers la gauche
  2. La probabilité conditionnelle reste égale à la probabilité sans l'épreuve
  3. La probabilité conditionnelle tend vers 0 (non calculable)

Exemple 1 : Epreuve "informative" :

$10^2 < P_{épreuve} / P_{annuelle}(N) < 10^4$

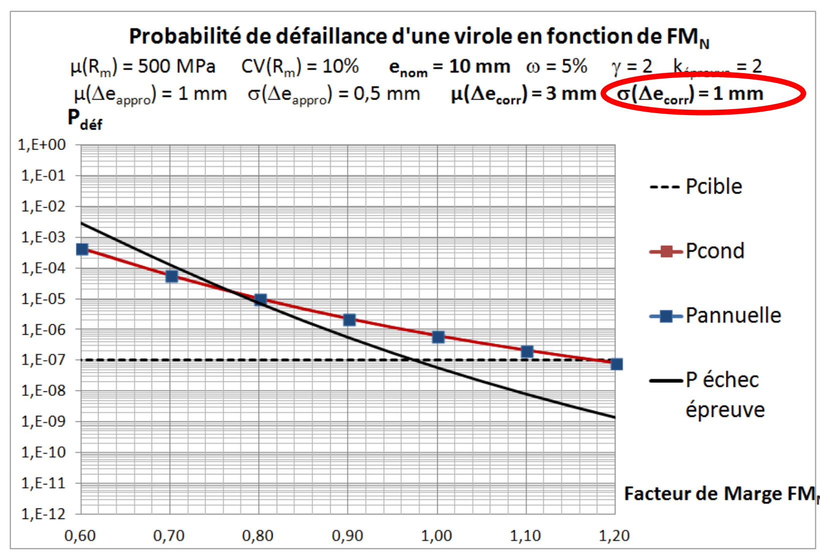
⇨ L'épreuve initiale diminue la probabilité annuelle de défaillance si $\sigma(\Delta e_{corr})$ reste modérée



Exemple 2 : Epreuve "non informative" :

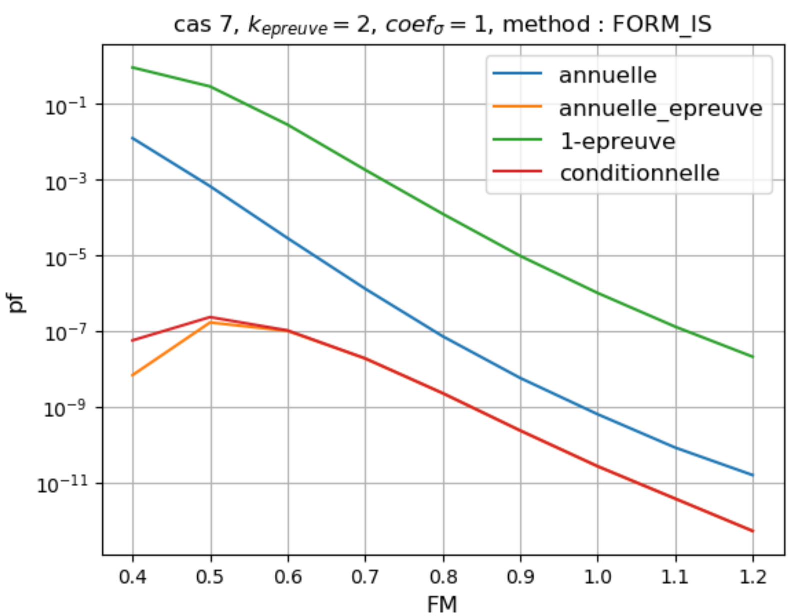
$P_{épreuve} / P_{annuelle} < 1$

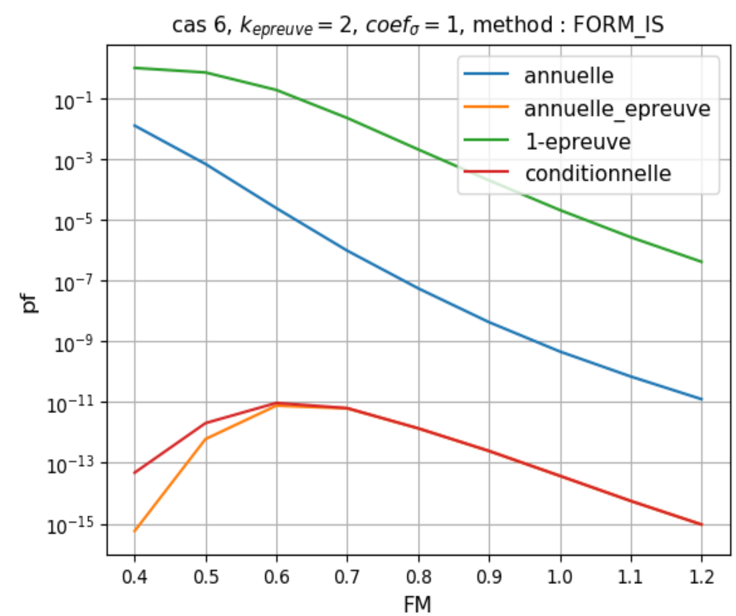
⇨ L'épreuve initiale n'a pas d'incidence sur la probabilité annuelle de défaillance dès lors que $\sigma(\Delta e_{corr})$ est trop élevé



EFFET DE L'ÉPREUVE HYDRAULIQUE

- **Réalisation de l'optimisation : plusieurs résultats possibles**
  - Utilisation de l'algorithme « Brent » pour l'optimisation (exemple cas 7)
  - Existence seulement d'une solution approchée → utilisation de l'algorithme Cobyla (exemple cas 6)
  - L'intervalle de confiance de la probabilité conditionnelle pour $FM = 1$ contient la probabilité cible → optimisation non nécessaire
  - La probabilité conditionnelle est nulle → pas d'optimisation possible





CONCLUSIONS

Intérêt de l’étude :

- Des probabilités de défaillance par ruine plastique ont pu être associées à des plages de Facteur de Marge en présence de dispersions sur les caractéristiques mécaniques et les épaisseurs résiduelles
- dans la plupart des cas, prendre des valeurs de calcul à **2 écarts-types** avec un coefficient de sécurité de **2,4** sur R_m est très conservatif
- Hormis quelques cas particuliers (faible épaisseur nominale associée à une forte dispersion de perte d’épaisseur), des valeurs de calcul prises à **1 écart-type** de la moyenne permettent de garantir $\mathbf{P_{annuelle} \leq P_{cible}}$ **lorsque FM ≥ 1**

OpenTURNS

- Chantier 2018 sur la fiabilité système (proba d’événements combinés)
- Vérifications concluantes avec autre outil (SYSREL®)
- Algorithmes satisfaisants pour l’étude

Compléments d’étude :

- Quantification des apports de l’épreuve hydraulique
  - Nombreux cas où la probabilité conditionnelle est nulle, jusqu’à FM = 0,7
- Résolution des problèmes de convergence associés


MERCI DE VOTRE ATTENTION !
QUESTIONS ?
eDF
PHIMECA