

Application du couplage mécano-fiabiliste aux structures navales corrodées

Mikaël Cazuguel & Jean-Yves Cognard

Financement : bourse DGA-CNRS

Collaboration : IFREMER et Université de Nantes

Contact : cazugumi@ensieta.fr





Plan de la présentation

- 1 – Problématique et objectifs**
- 2 – Les outils de la fiabilité**
- 3 – Prise en compte des effets de corrosion en éléments finis non-linéaires 2D**
- 4 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps**
- 5 – Conclusions & perspectives**

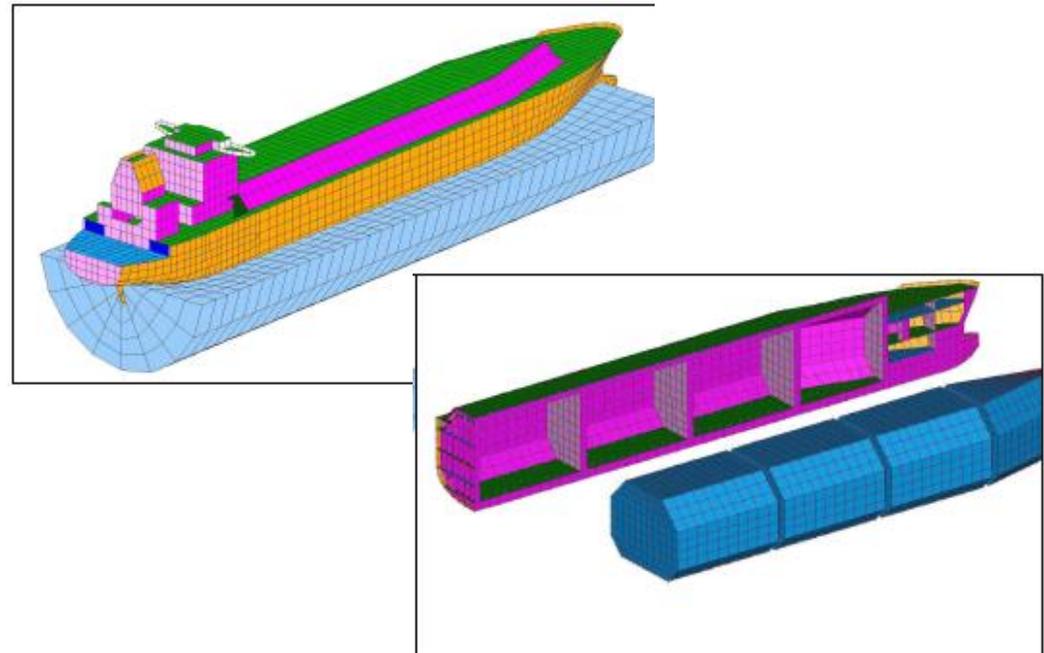
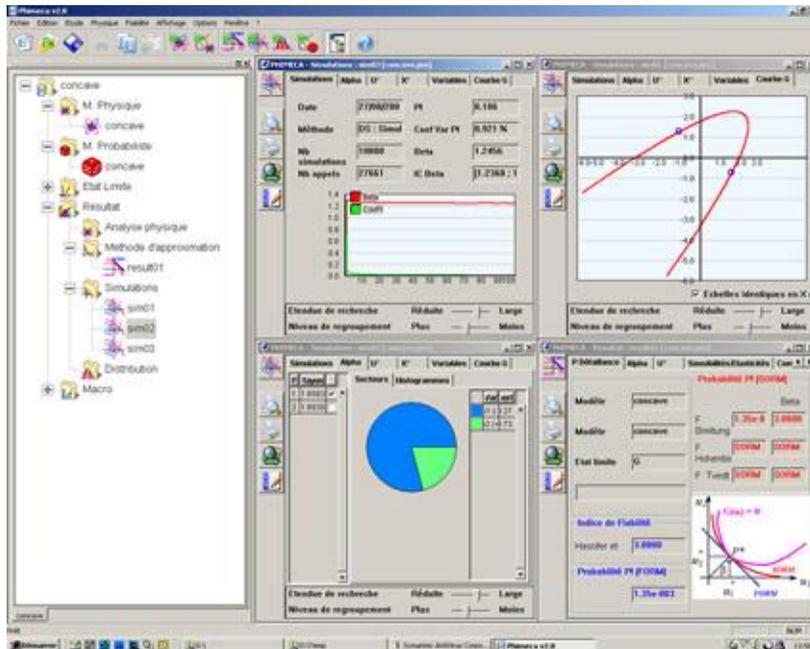


> 1 – Problématique & objectifs

Contexte

➤ Efficacité et robustesse des méthodes fiabilistes

➤ Modélisation de structures complexes par analyse éléments finis

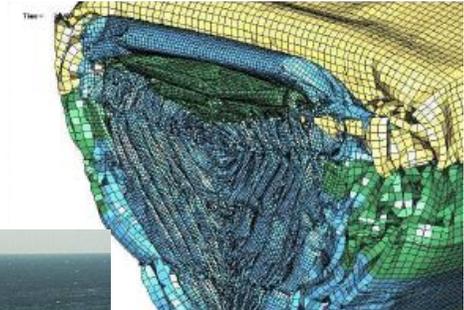


Design réaliste : Prise en compte du comportement non-linéaire matériau
Problèmes non-linéaires dépendant du temps coûteux
Adapter l'analyse non-linéaire aux parties les plus sollicitées

> 1 – Problématique & objectifs

Contexte

- Efficacité et robustesse des méthodes fiabilistes
- Modélisation de structures complexes par analyse éléments finis
- Etude de la durabilité des structures marines :
 - ❑ Corrosion, soudage, fatigue,... : phénomènes stochastiques
=> Méthodes de fiabilité fonction du temps requise
 - ❑ Pas de solutions analytiques
=> Analyse éléments finis non-linéaire requise





1 – Introduction & objectifs

Objectifs de la thèse

- **Etre capable d'appliquer une approche fiabiliste fonction du temps à des structures industrielles à comportement non-linéaire, dépendant du temps, etc... modélisées par éléments finis**
- **But du couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps : évaluer plus précisément la durabilité d'une structure tout au long de sa durée de vie, et fournir des méthodes d'optimisation des facteurs de sécurité**



2 – Les outils de la fiabilité indépendante du temps

➤ Étapes d'une étude fiabiliste

1 - Définir le modèle mécanique ;

2 - Définir les données probabilistes, ou variables de conception : $\mathbf{X}(t, \omega)$

3 - Choisir le scénario de défaillance (dimensionnant pour la structure)

⇒ définition de la fonction de performance : $G(t, \mathbf{X}(t, \omega))$

❑ Surface d'état-limite

$$G(t, \mathbf{X}(t, \omega)) = 0$$

❑ Domaine de sûreté D_s

$$G(t, \mathbf{X}(t, \omega)) > 0$$

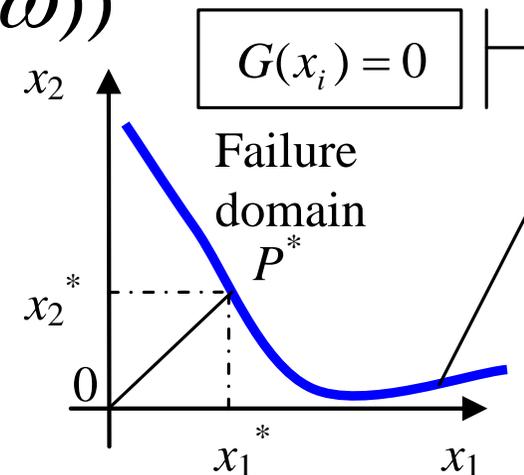
❑ Domaine de défaillance D_f

$$G(t, \mathbf{X}(t, \omega)) \leq 0$$

4 - Effectuer les calculs ;

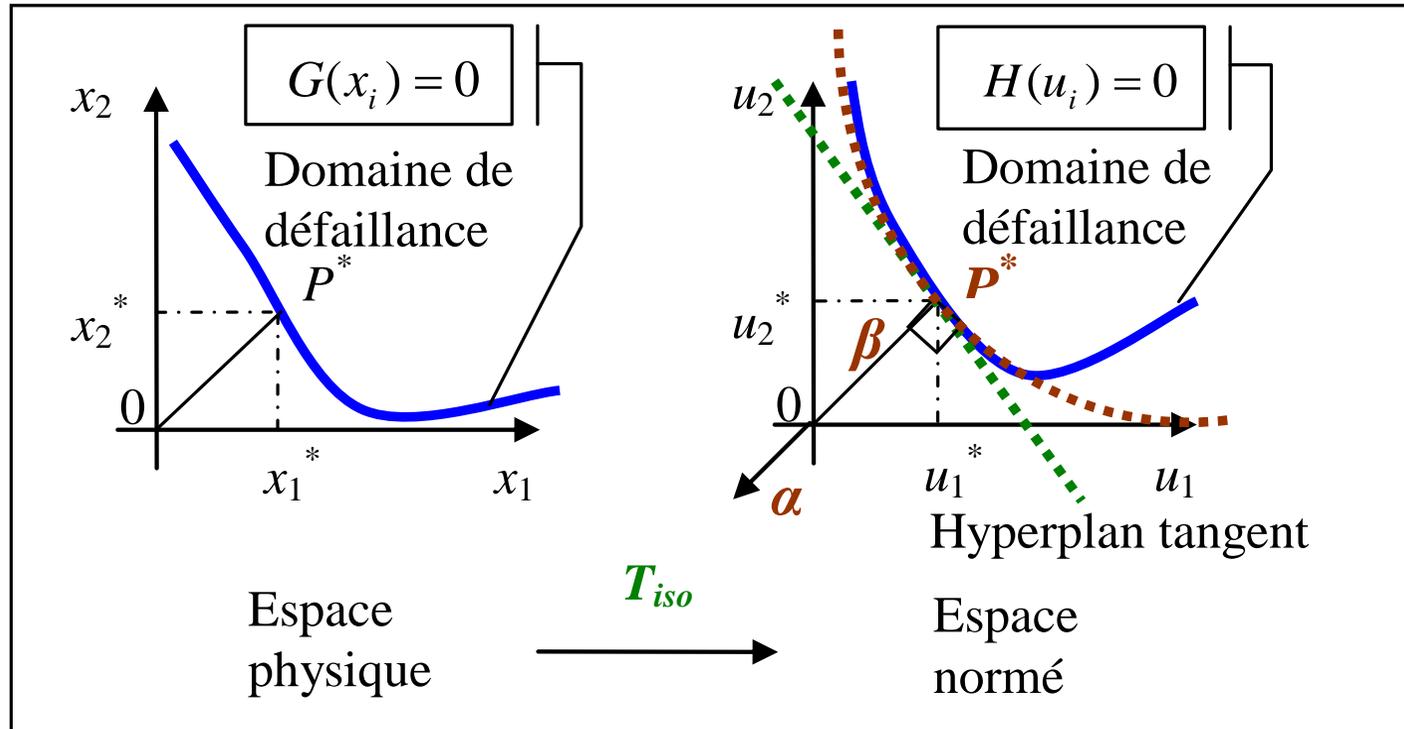
5 - Analyser les résultats.

$$P_{f,i}(T) = \text{prob}(G(T, \mathbf{X}(T, \omega)) \leq 0)$$



> 2 – Les outils de la fiabilité indépendante du temps

➤ Méthode d'approximation FORM/SORM

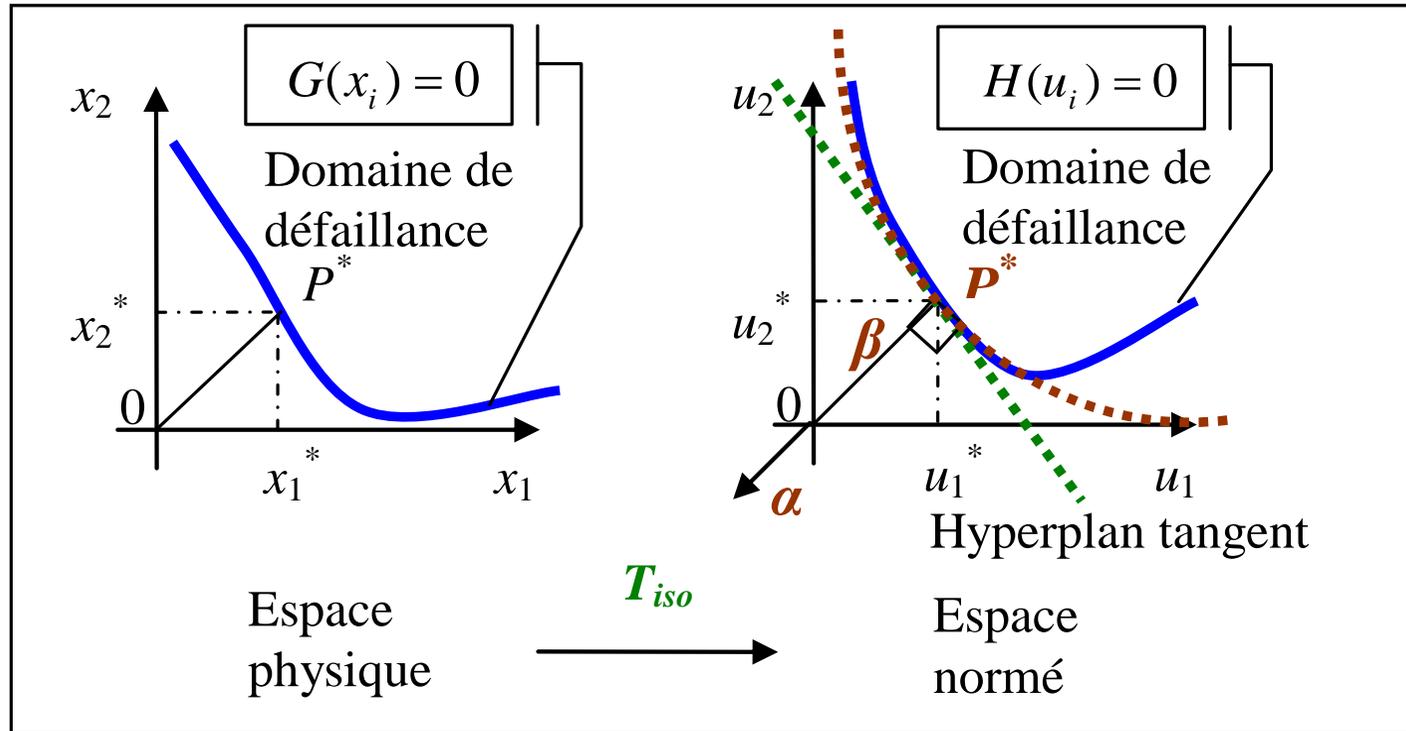


$$\beta_{HL} = \text{distance}(OP^*) = \min_{H(u_i) \leq 0} \left(\sqrt{\mathbf{u}^T \cdot \mathbf{u}} \right) = \min_{G(x_j) \leq 0} \left(\sqrt{\sum_i T_i^2(x_j)} \right)$$



2 – Les outils de la fiabilité indépendante du temps

➤ Méthode d'approximation FORM/SORM



α : cosinus directeurs

u^* : coordonnées du point de conception P^*

β : indice de fiabilité

Φ : fonction de répartition de la loi normale centrée réduite

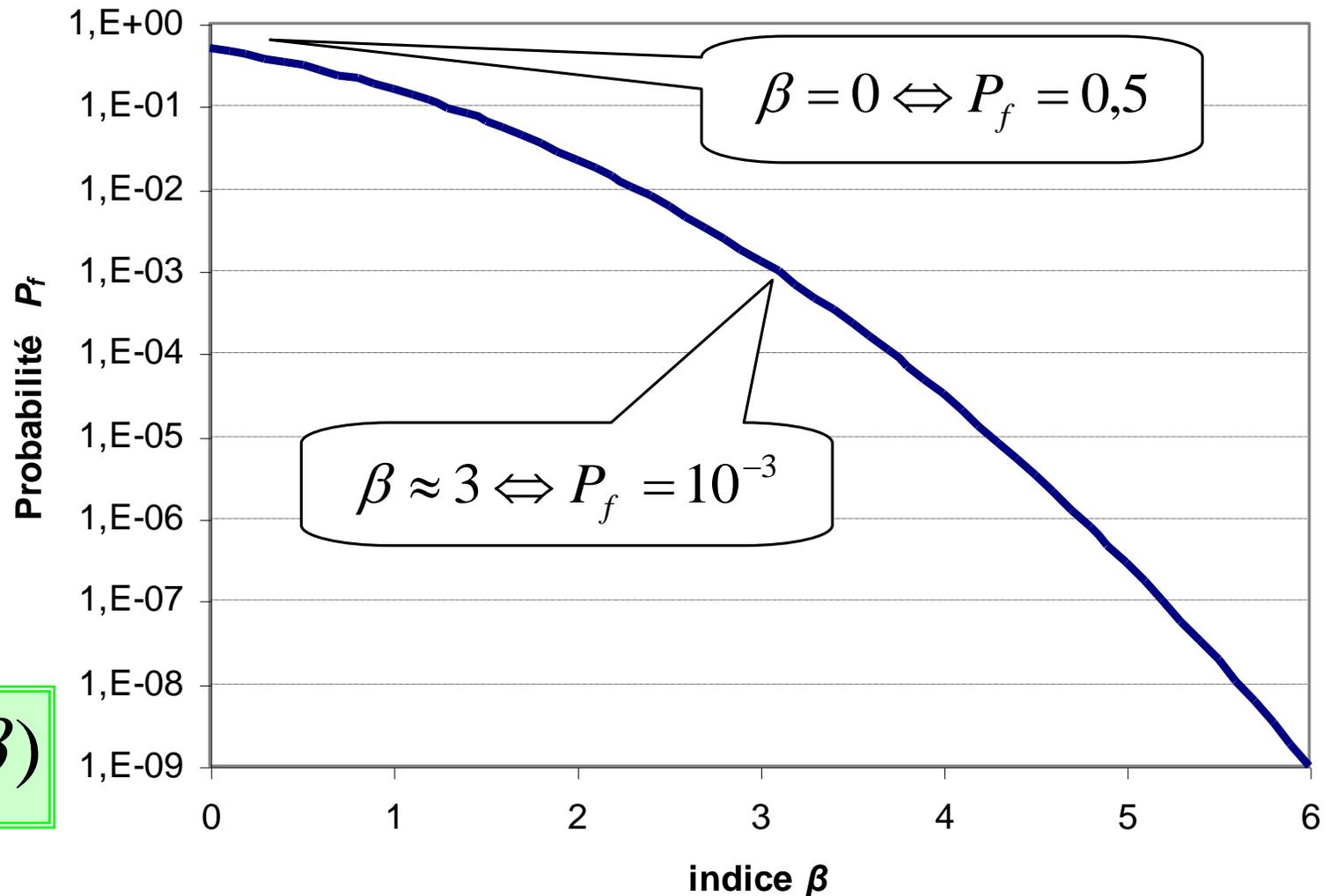
$$P_{f,i} \approx \Phi(-\beta)$$





2 – Les outils de la fiabilité indépendante du temps

➤ Méthode d'approximation FORM/SORM



$$P_{f,i} \approx \Phi(-\beta)$$



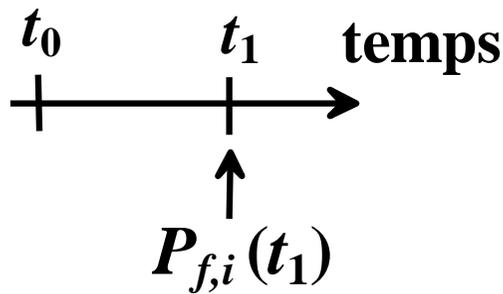
2 – Les outils de la fiabilité fonction du temps

- Probabilité de défaillance instantanée et probabilité de défaillance cumulée

**Fiabilité indépendante
du temps**

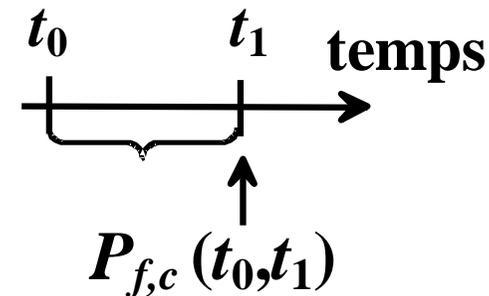
**Fiabilité dépendante
du temps**

Probabilité de
défaillance à t_1



\neq

Probabilité de
défaillance sur $[t_0, t_1]$



$$P_{f,i}(t_1) = \text{Prob}(G(t_1, \mathbf{X}(t_1, \omega)) \leq 0)$$

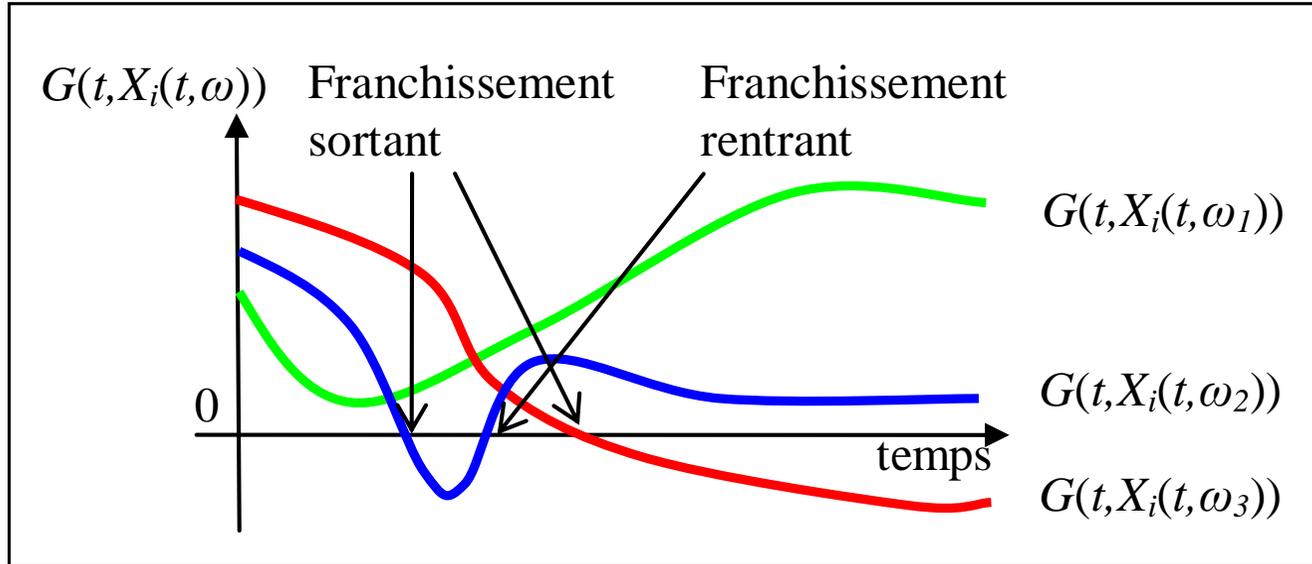
$$P_{f,c}(t_0, t_1) = \text{Prob}(\exists t \in [t_0, t_1], \text{ tel que } G(t, \mathbf{X}(t, \omega)) \leq 0)$$

- Cas d'égalité entre probabilité de défaillance instantanée et cumulée :
décroissance de la fonction d'état-limite G sur l'intervalle d'étude $[0, T]$



2 – Les outils de la fiabilité fonction du temps

➤ L'approche par taux de franchissements



- ❑ $N^+(t_1, t_2)$: nombre de franchissements sortant sur l'intervalle $[t_1, t_2]$

$$v^+(t) = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{P(N^+(t, t + \Delta\tau) = 1)}{\Delta\tau}$$

- ❑ Encadrement de $P_{f,c}$ [Shinozuka 1964, Bolotin 1981] :

$$\max_{0 \leq t \leq T} [P_{f,i}(t)] \leq P_{f,c}(0, T) \leq P_{f,i}(0) + \int_0^T v^+(t) dt$$



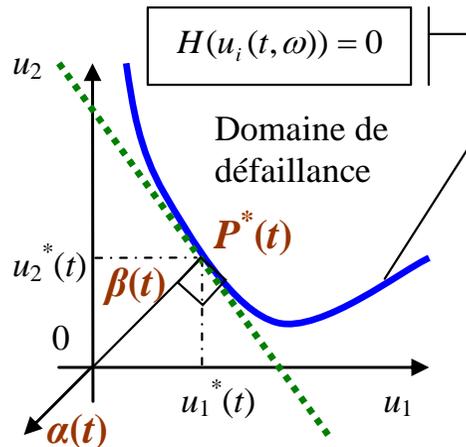


2 – Les outils de la fiabilité fonction du temps

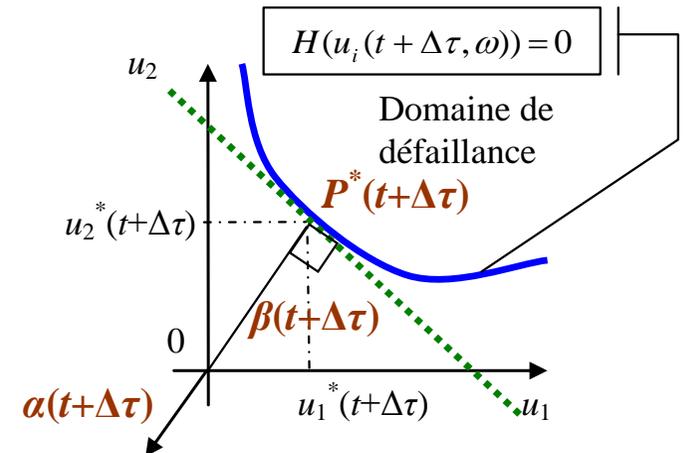
➤ Méthodologie de la méthode PHI2 (en utilisant FORM)

Approche système (ne nécessite que des outils de calcul de $P_{f,i}$) pour l'évaluation de la probabilité dans la définition du taux de franchissements :

- 1ère analyse
FORM :



- 2ème analyse
FORM :



- Corrélation entre A et B:

$$\rho_{GG}(t, t + \Delta\tau) = -\alpha(t) \cdot \alpha(t + \Delta\tau)$$

=> Evaluation au 1er ordre du taux de franchissements PHI2 [Renaud & Lemaire 2002] :

$$v_{PHI2}^+(t) = \frac{\Phi_2(\beta(t), -\beta(t + \Delta\tau), \rho_{GG}(t, t + \Delta\tau))}{\Delta\tau}$$

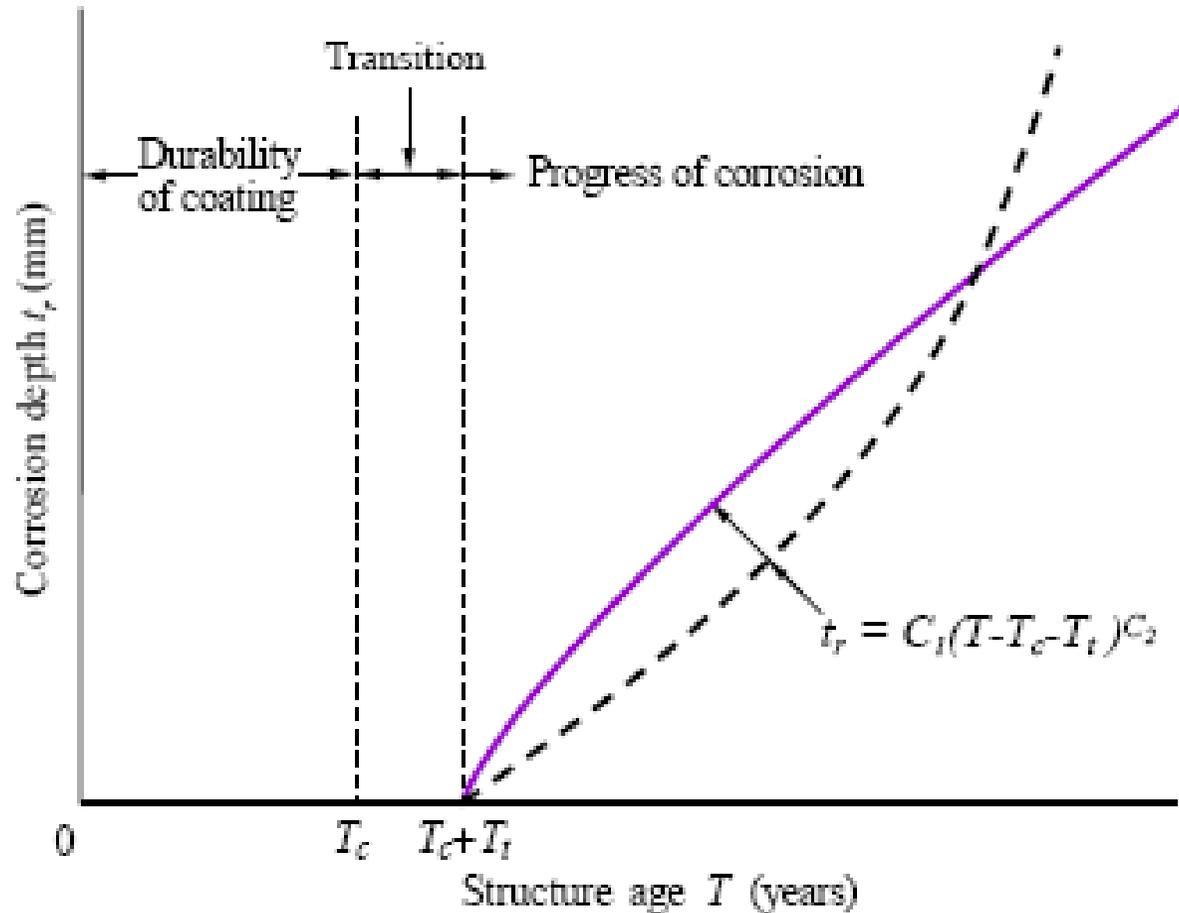
➤ Amélioration [Sudret 2005] :

$$v_{PHI2}^{+,new}(t) = \|\vec{\alpha}'(t)\| \cdot \varphi(\beta(t)) \cdot \Psi(\beta'(t) / \|\vec{\alpha}'(t)\|)$$

> 3 – Prise en compte des effets de corrosion en EF NL 2D

➤ Dans la littérature (mécano-fiabiliste) :

□ Nombreux modèles de propagation de la corrosion



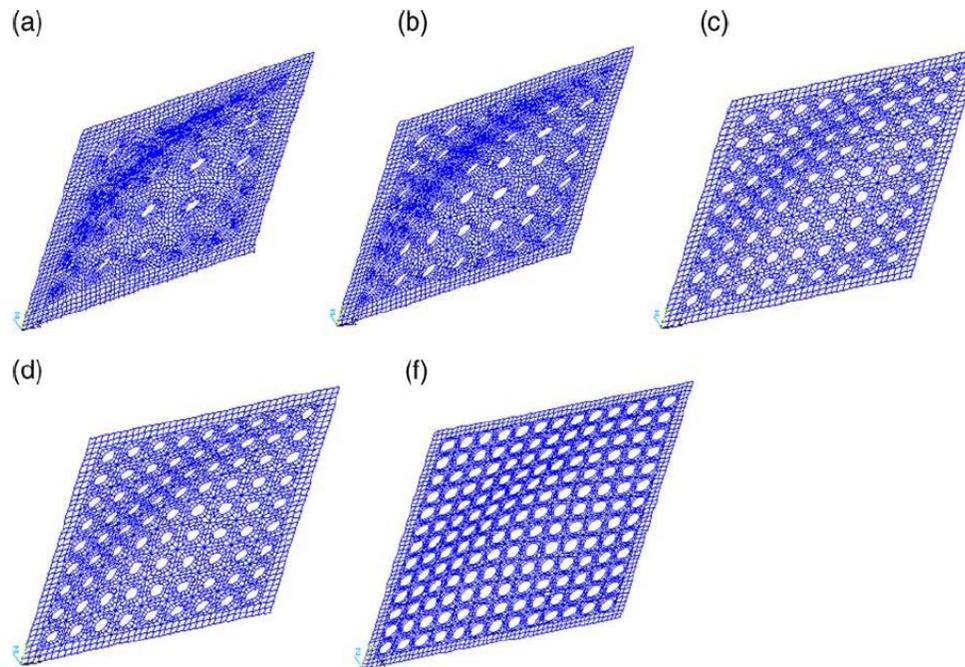
[Paik & Thayamballi 2002]



3 – Prise en compte des effets de corrosion en EF NL 2D

➤ Dans la littérature (mécano-fiabiliste) :

- ❑ Nombreux modèles de propagation de la corrosion
- ❑ Peu de modélisations E.F. prenant en compte les effets de corrosion (perte d'épaisseur en cas de corrosion généralisée, aspérités si piqures...)



[Paik et al. 2004]

Fig. 5. Deflected shapes of a pitted plate under edge shear, with varying level of DOP at the ultimate strength, as obtained by ANSYS: (a) DOP 4.9%; (b) DOP 9.6%; (c) DOP 15.9%; (d) DOP 23.8%; (e) DOP 33.2%.



3 – Prise en compte des effets de corrosion en EF NL 2D

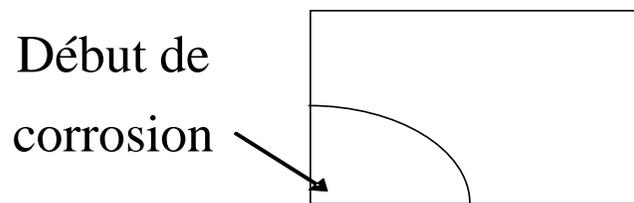
- **Dans la littérature (mécano-fiabiliste) :**
 - ❑ **Nombreux modèles de propagation de la corrosion**
 - ❑ **Peu de modélisations E.F. prenant en compte les effets de corrosion**
(perte d'épaisseur en cas de corrosion généralisée, aspérités si piqures...)
- **Modèles EF difficiles à utiliser dans notre cas : re-maillage de la structure à chaque pas de temps pour traiter les variations d'épaisseurs => approximations numériques dues au transfert d'information entre maillages**





3 – Prise en compte des effets de corrosion en EF NL 2D

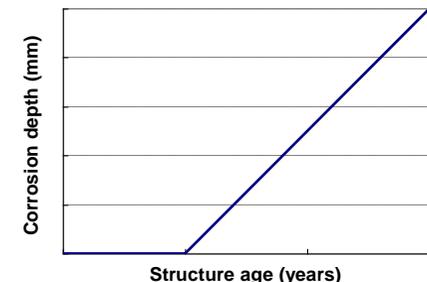
- Dans la littérature (mécano-fiabiliste) :
 - ❑ Nombreux modèles de propagation de la corrosion
 - ❑ Peu de modélisations E.F. prenant en compte les effets de corrosion (perte d'épaisseur en cas de corrosion généralisée, aspérités si piqures...)
- Modèles EF difficiles à utiliser dans notre cas : re-maillage de la structure à chaque pas de temps pour traiter les variations d'épaisseurs => approximations numériques dues au transfert d'information entre maillages
- Approche proposée en EF 2D à comportement non-linéaire :
 - ❑ Modélisation 2D compatible avec de multiples sites de corrosion
 - ❑ Dans un premier temps, utilisation d'un modèle classique d'évolution temporelle (pas de temps de transition, progression linéaire de la corrosion)



$$C(M, t) = f(t) \cdot g(M)$$

$$f(t) = \frac{\text{Prof. corr.}(t)}{\text{Prof. corr.}(t = 15 \text{ ans})}$$

$$g(M) = \text{champ elliptique}$$

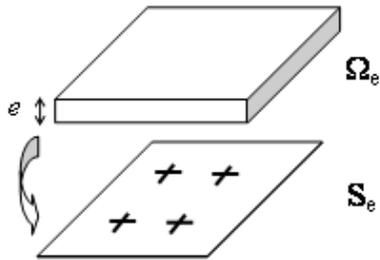




3 – Prise en compte des effets de corrosion en EF NL 2D

➤ Approche proposée en EF 2D à comportement non-linéaire :

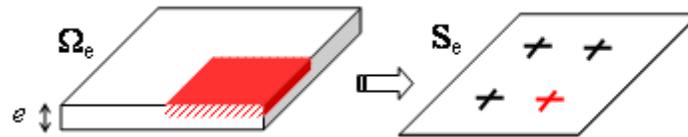
❑ Variation de l'épaisseur par modification de la procédure de résolution Cast3M®



$$\int_{\Omega_e} F(M, t) = \sum_{\Omega_e} p.F(M, t)$$

$$\int_{\Omega_e} F(M, t) = e \cdot \int_{S_e} F(M, t) = e \sum_{S_e} p.F(M, t)$$

$$\int_{\Omega_e} F(M, t) = \sum_{S_e} e(M, t).p.F(M, t)$$



Equation d'équilibre (PPV) =>
$$\int_{\Omega} [B]^t [\sigma_i] dV - \int_{\Omega} [N]^t \{f^v\} dV + \int_{\partial\Omega} [N]^t \{f^s\} dS = 0$$

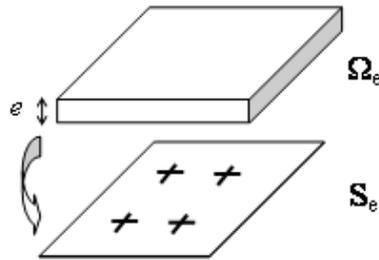




3 – Prise en compte des effets de corrosion en EF NL 2D

➤ Approche proposée en EF 2D à comportement non-linéaire :

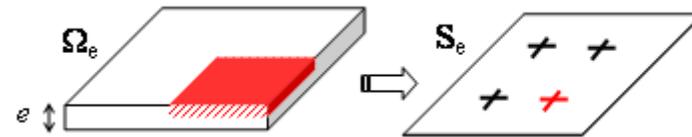
❑ Variation de l'épaisseur par modification de la procédure de résolution Cast3M®



$$\int_{\Omega_e} F(M, t) = \sum_{\Omega_e} p.F(M, t)$$

$$\int_{\Omega_e} F(M, t) = e \cdot \int_{S_e} F(M, t) = e \sum_{S_e} p.F(M, t)$$

$$\int_{\Omega_e} F(M, t) = \sum_{S_e} e(M, t).p.F(M, t)$$



Equation d'équilibre (PPV) =>
$$\int_{\Omega} [B]^t [\sigma_i] dV - \int_{\Omega} [N]^t \{f^v\} dV + \int_{\partial\Omega} [N]^t \{f^s\} dS = 0$$

Processus itératif

EF non-linéaire =>

$$\left\{ \begin{array}{l} [K_e] \{\delta u\} = \{\delta f\} \\ \text{Accélération de convergence} \\ \text{Comportement non - linéaire} \end{array} \right.$$

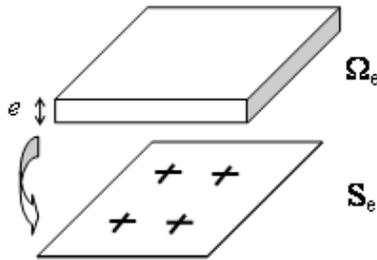




3 – Prise en compte des effets de corrosion en EF NL 2D

➤ Approche proposée en EF 2D à comportement non-linéaire :

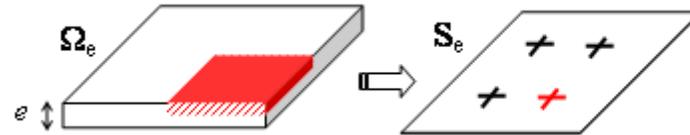
❑ Variation de l'épaisseur par modification de la procédure de résolution Cast3M®



$$\int_{\Omega_e} F(M, t) = \sum_{\Omega_e} p.F(M, t)$$

$$\int_{\Omega_e} F(M, t) = e \cdot \int_{S_e} F(M, t) = e \sum_{S_e} p.F(M, t)$$

$$\int_{\Omega_e} F(M, t) = \sum_{S_e} e(M, t).p.F(M, t)$$



Equation d'équilibre (PPV) =>
$$\int_{\Omega} [B]^t [\sigma_i] dV - \int_{\Omega} [N]^t \{f^v\} dV + \int_{\partial\Omega} [N]^t \{f^s\} dS = 0$$

Processus itératif

EF non-linéaire =>

$$[K_e] \{\delta u\} = \{\delta f\}$$

$$\int_{\Omega} [B]^t [\sigma_i] dV = \int_S [B]^t [\sigma_i] [e] dS$$

Accélération de convergence

Comportement non - linéaire





3 – Prise en compte des effets de corrosion en EF NL 2D

➤ Implémentation dans Cast3M® :

❑ Modélisation de la perte d'épaisseur

- Fonction de l'espace et du temps
 - Opérateur CHAR
 - utilisation d'un objet de type CHARGEMENT
 - possibilité de superposer plusieurs « couples de fonctions »

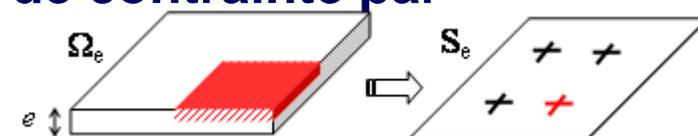
$$C(M, t) = f(t) \cdot g(M)$$

❑ Epaisseur à un instant donné

- Opérateur TIRE
 - permet de tirer d'un objet de type CHARGEMENT un objet correspondant au chargement à un instant donné

❑ Prise en compte de la perte d'épaisseur dans le calcul

- Procédures PASAPAS & INCREME
- Sauvegarde des informations dans la TABLE de PASAPAS
- Forces internes : multiplication du champ de contrainte par l'épaisseur avant l'utilisation de BSIGMA



> 3 – Prise en compte des effets de corrosion en EF NL 2D

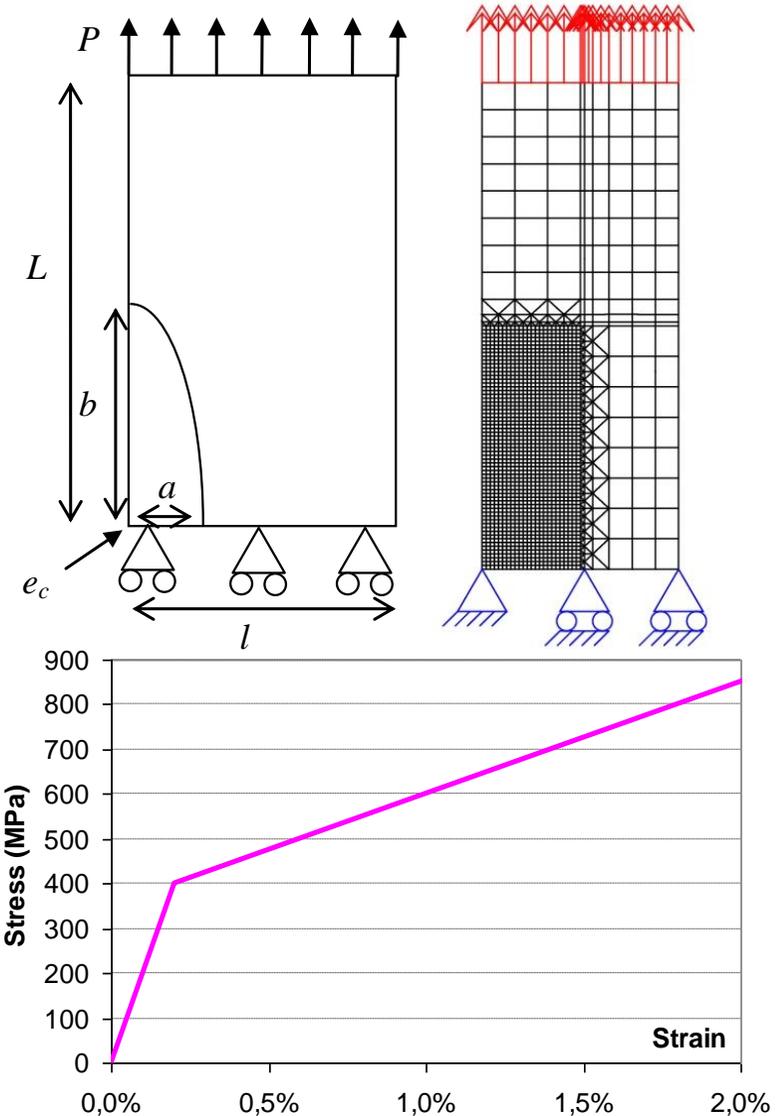
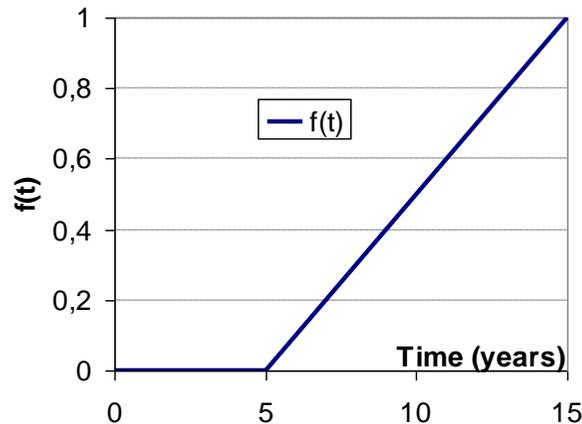
➤ Modèle mécanique étudié:

- ❑ Géométrie déterministe : $L = 5 \text{ mm}$, $l = 2 \text{ mm}$,
 $a = 0.5 \text{ mm}$, $b = 2.5 \text{ mm}$, $e_c = 0,5 \text{ mm}$
- ❑ Maillage par EF quadrangulaire à 8 noeuds
- ❑ Chargement P modélisé par un processus stochastique (EOLE), moy.=400 MPa, e.t.=5%
- ❑ Loi de comportement matériau simple : élasto-plastique à écrouissage isotrope linéaire
- ❑ Evolution spatiale et temporelle de la corrosion :

$$C(M, t) = f(t) \cdot g(M)$$

$$f(t) = \frac{\text{Prof. corr.}(t)}{\text{Prof. corr.}(t = 15 \text{ ans})}$$

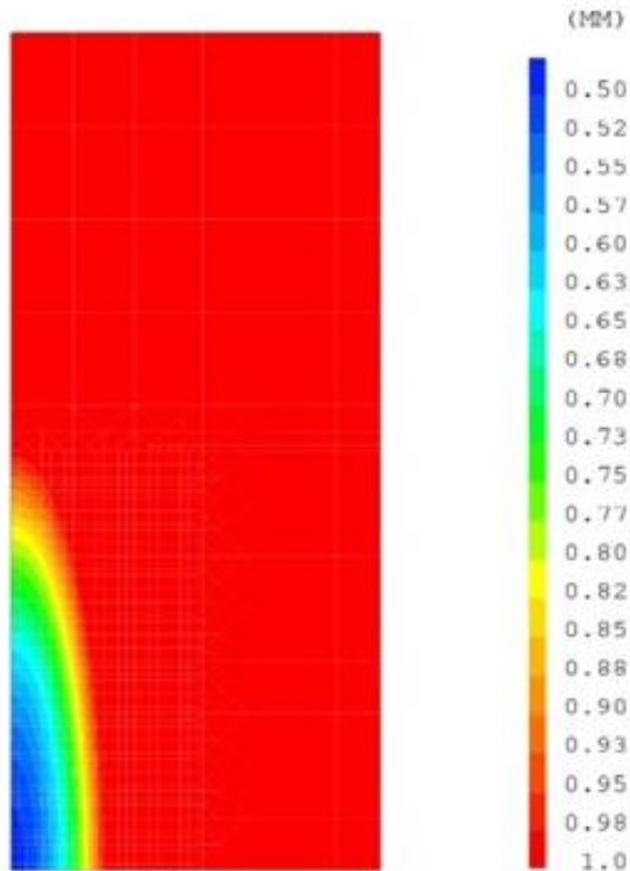
$$g(M) = \text{Champ elliptique}$$



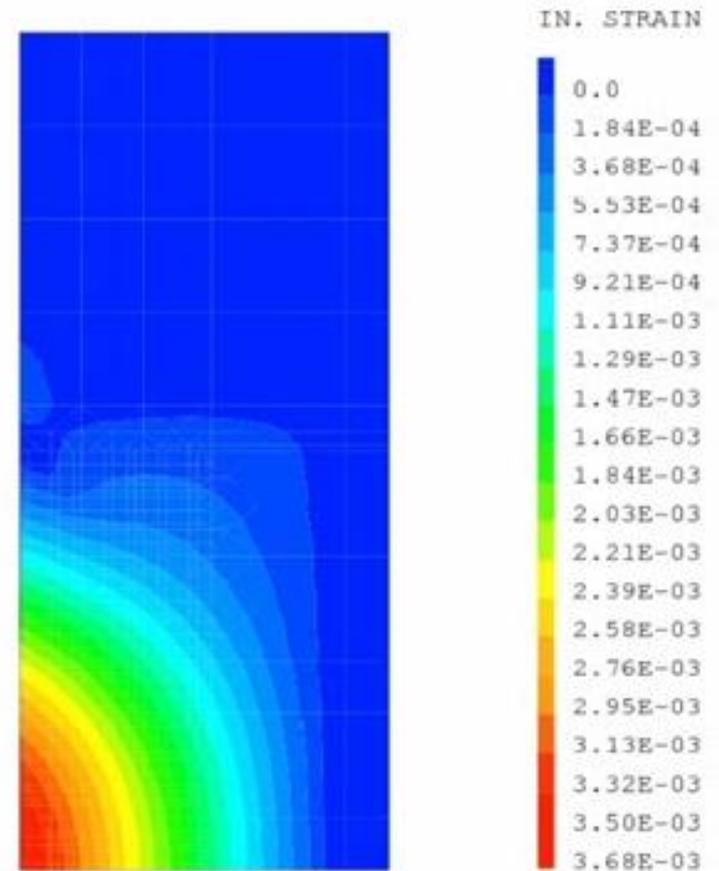


3 – Prise en compte des effets de corrosion en EF NL 2D

- Exemple de calcul non-linéaire avec variation de l'épaisseur :



THICKNESS AT TIME T = 15.0 YEARS



CUMULATIVE PLASTIC STRAIN AT T = 15.0 YEARS





4 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

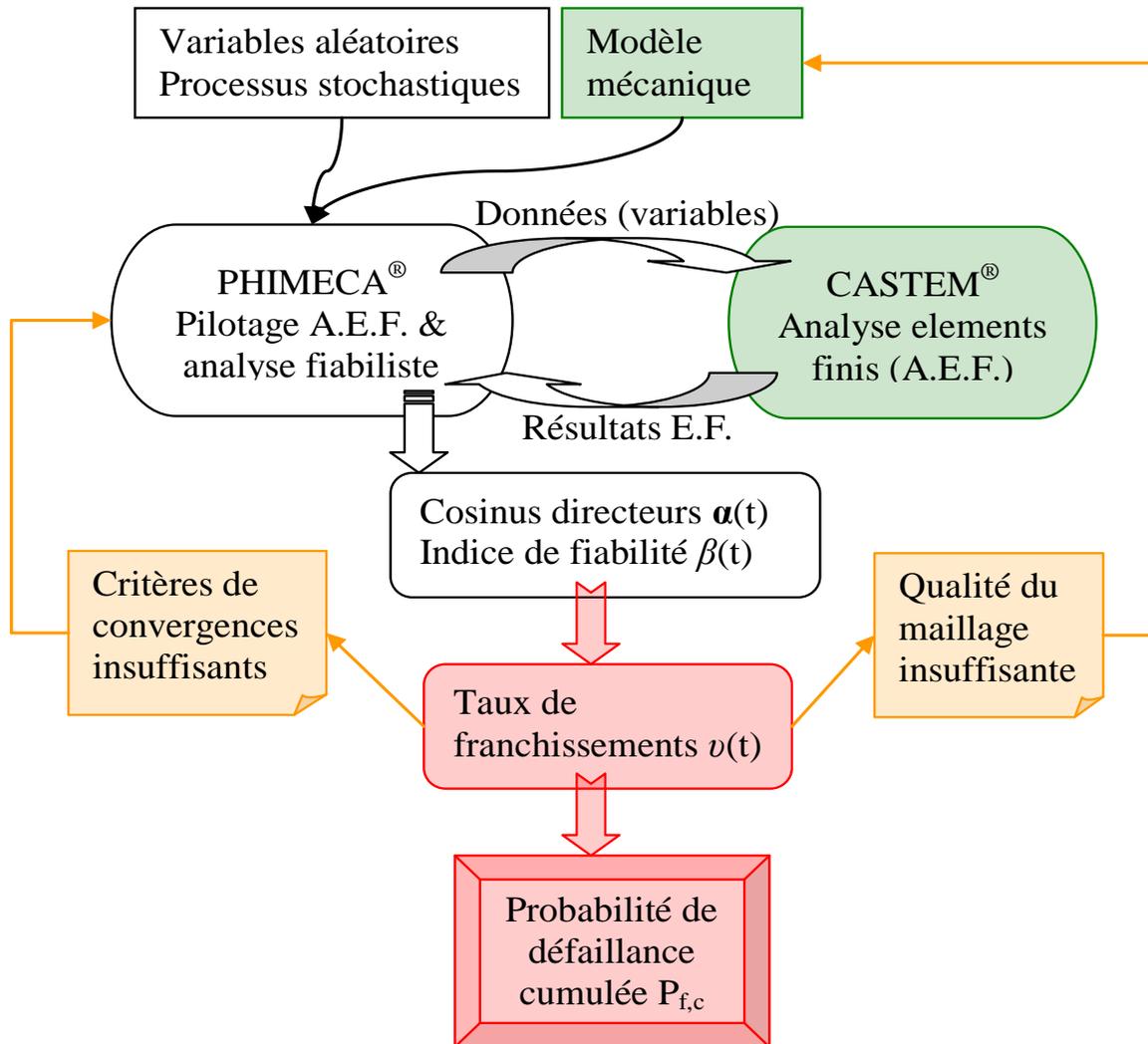
➤ Pourquoi utiliser Cast3M® :

- PHIMECA pilote le calcul EF pour un jeu de variables donné
(variables aléatoires et processus stochastiques)
 - **Modèle mécanique entièrement paramétré**
 - géométrie,
 - comportement,
 - chargement,
 - maillage...

- **Analyse des résultats**
 - Assurer une discrétisation en espace « constante » dans les zones fortement sollicitées (points de contrôle pour le maillage)
 - Assurer une discrétisation en temps compatible avec l'histoire en temps du chargement (discrétisation en temps « adaptable »)
 - Possibilité de définir facilement des fonctions de performance “complexes”

> 4 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

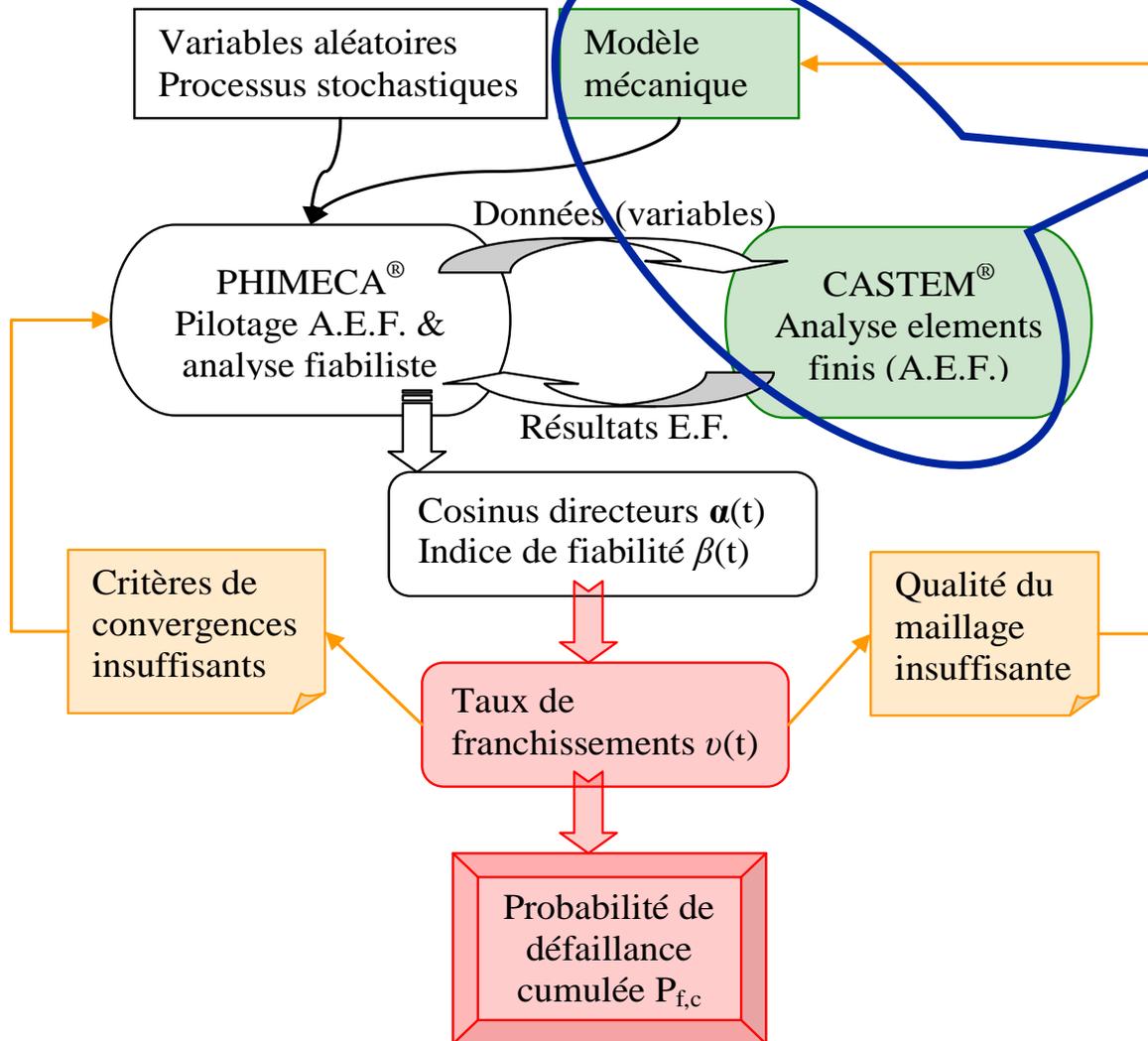
➤ Schéma d'implémentation du couplage





4 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

➤ Schéma d'implémentation du couplage

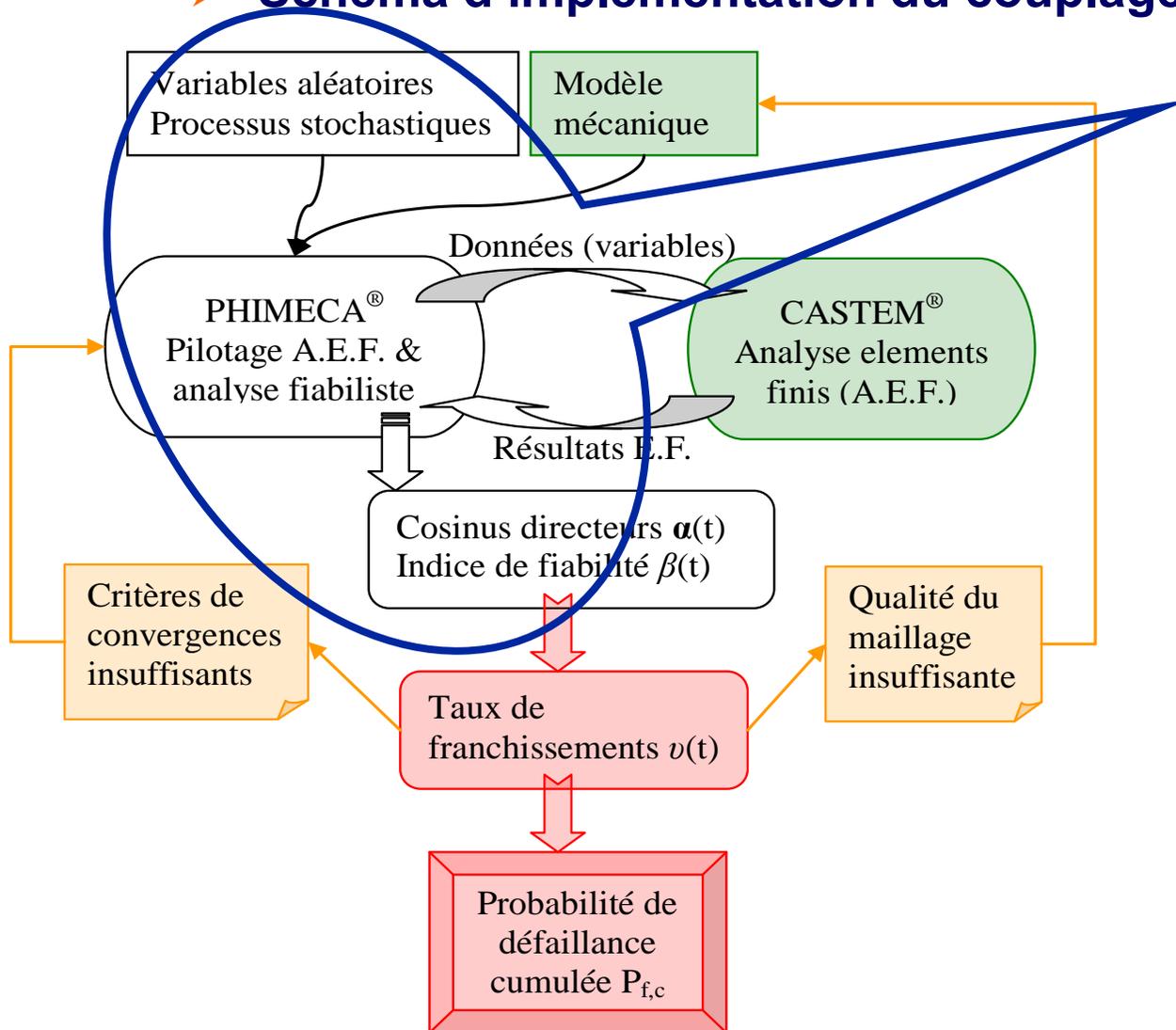


Définition du modèle mécanique E.F. dont la réponse durant l'analyse fiabiliste sera évalué par Cast3M



> 4 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

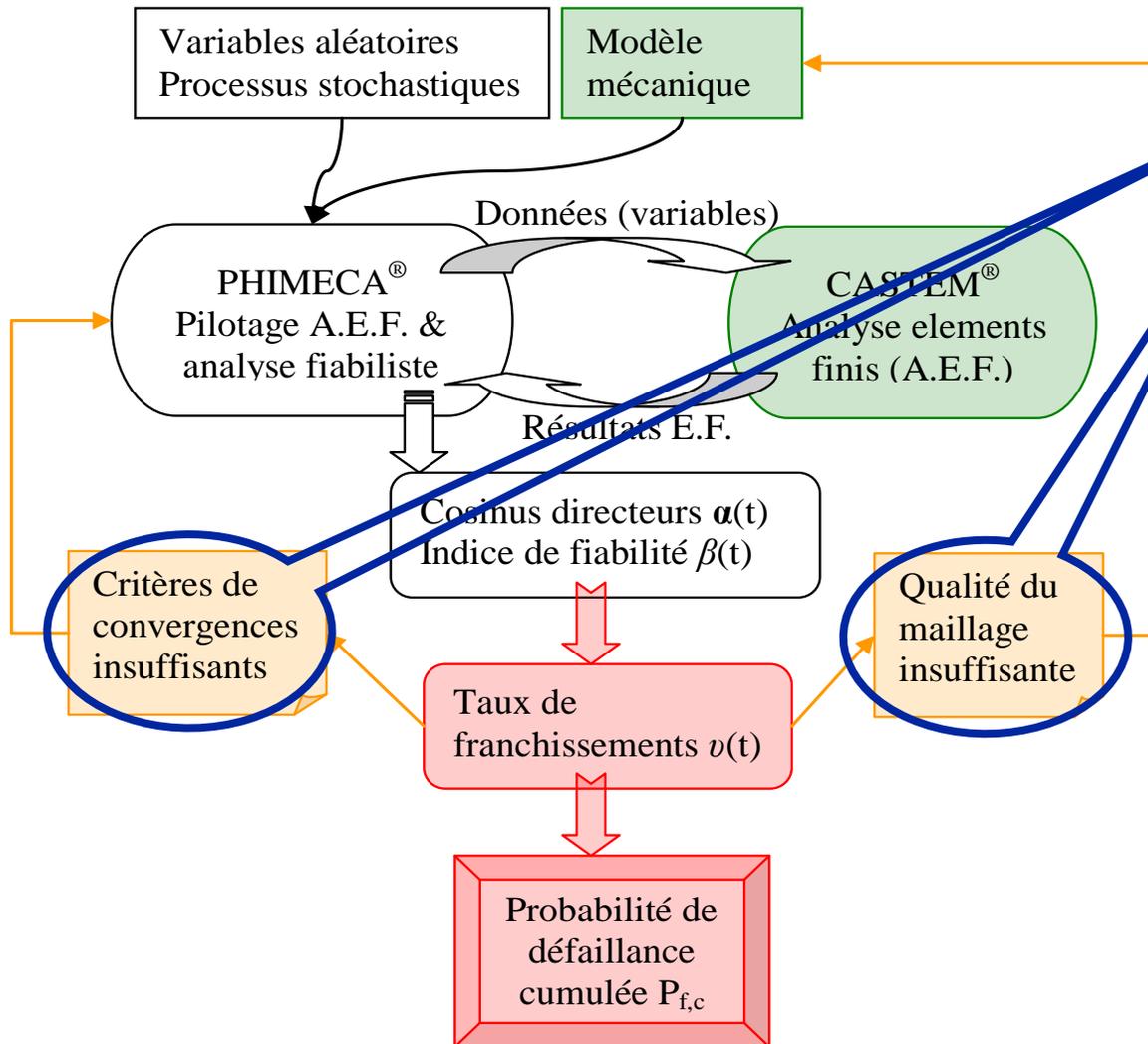
➤ Schéma d'implémentation du couplage



Définition des variables aléatoires et processus stochastiques dans PHIMECA, qui pilote l'analyse fiabiliste par couplage direct avec Cast3M

> 4 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

➤ Schéma d'implémentation du couplage



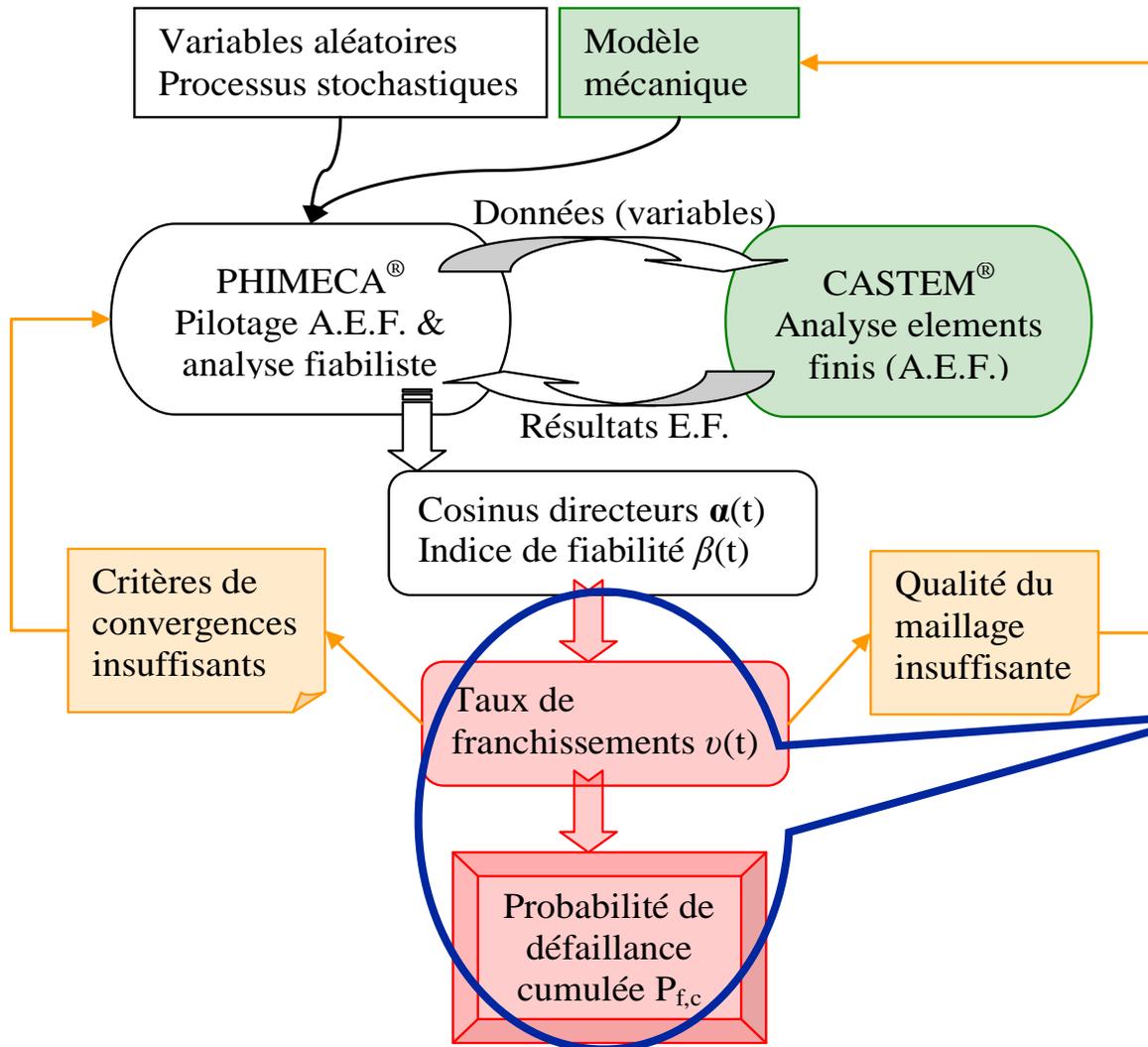
**Corrélation ρ_{GG} inappropriée
=> réévaluation des produits de l'analyse fiabiliste :**

- critères de convergence plus stricts sur l'algorithme fiabiliste ?

- meilleur modèle E.F. ?

> 4 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

➤ Schéma d'implémentation du couplage



***Evaluation de la fiabilité
fonction du temps effectuée
par la méthode PHI2***

> 4 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

- Choix d'un scénario de défaillance prenant en compte le comportement non-linéaire du matériau :

« la déformation plastique cumulée maximale $p_{max}(t)$ dépasse une déformation limite $p_{lim}=1. 10^{-2}$ » avec

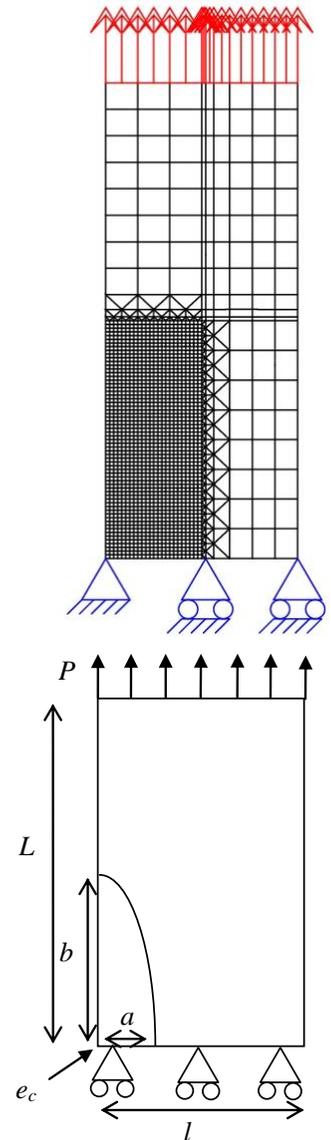
$$p_{max}(t) = \sup_{M \in \text{Plaque}, \tau \leq t} p(M, \tau)$$

Fonction de performance G_ε associée au scénario :

$$G_\varepsilon(t) = p_{lim} - p_{max}(t)$$

Conséquence de la décroissance de G_ε :

$$P_{f,c}(0, \tau) = P_{f,i}(\tau) \quad \forall \tau \in [0, T]$$





4 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

➤ Paramètres des variables aléatoires (distributions gaussiennes):

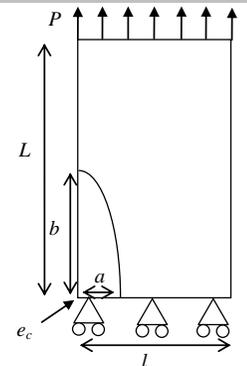
Type	Variable	Moy.	E.T.
Corrosion	1/2 petit axe de l'ellipse a (mm)	0.5	10%
	1/2 grand axe de l'ellipse b (mm)	2.5	
	Profondeur de corrosion max. e_c (mm)	0.5	
	Durabilité de la peinture T_c (years)	5	
Matériaux	Déf. plastique cumulée limite p_{lim}	1.E-2	10%
	Limite élastique initiale σ_y (MPa)	400	5%
Chargement	Chargement aléatoire P (N)	800	5%
	Chargement stochastique Moy. 800 N, E.T. 5%	$\xi_i(\omega)$	0

Cas du chargement aléatoire : 7 variables aléatoires

=> coût calcul d'une analyse fiabiliste $\approx 3h$

Cas du chargement stochastique : 21 variables aléatoires

=> coût calcul d'une analyse fiabiliste $\approx 8h$





4 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

➤ Paramètres des variables aléatoires (distributions gaussiennes):

Type	Variable	Moy.	E.T.
Corrosion	1/2 petit axe de l'ellipse a (mm)	0.5	10%
	1/2 grand axe de l'ellipse b (mm)	2.5	
	Profondeur de corrosion max. e_c (mm)	0.5	
	Durabilité de la peinture T_c (years)	5	
Matériaux	Déf. plastique cumulée limite p_{lim}	1.E-2	10%
	Limite élastique initiale σ_y (MPa)	400	5%
Chargement	Chargement aléatoire P (N)	800	5%
	Chargement stochastique Moy. 800 N, E.T. 5%	$\xi_i(\omega)$	0

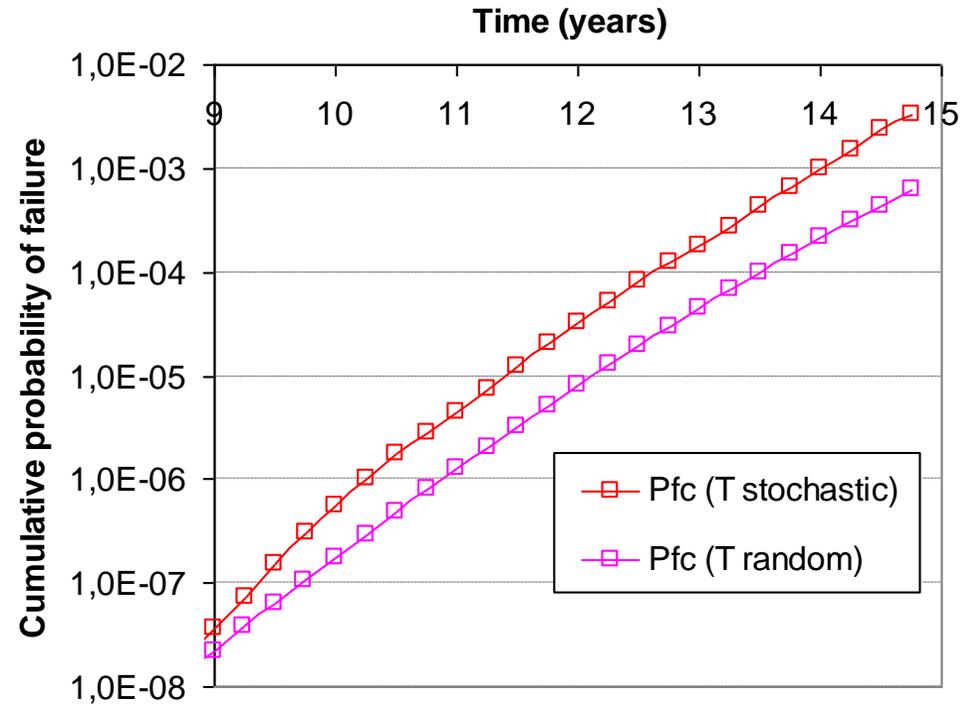
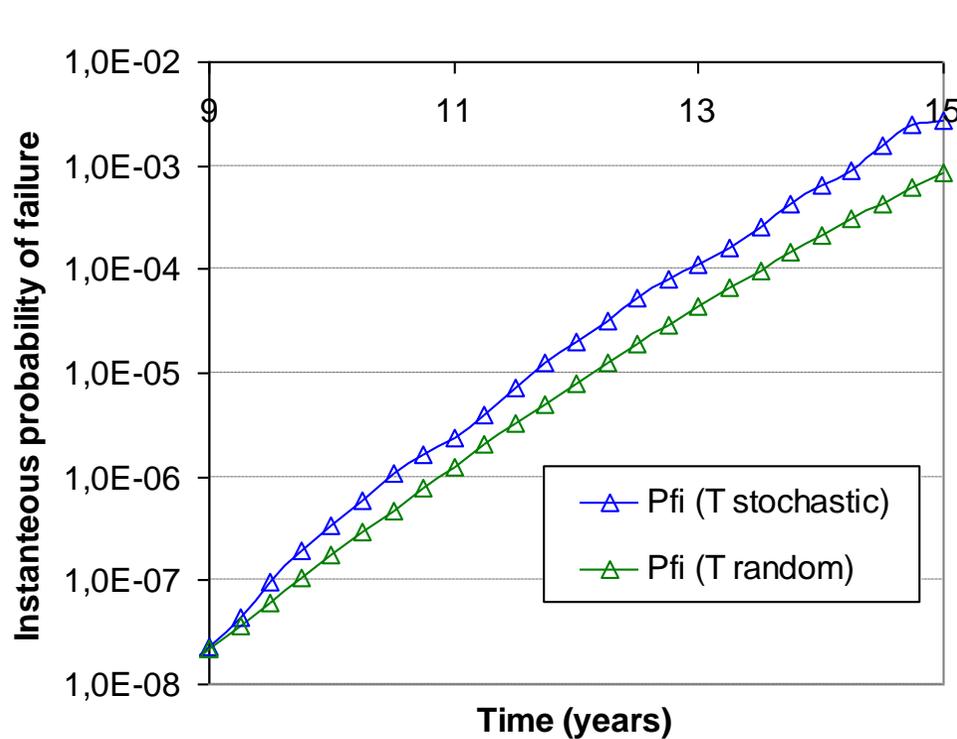
➤ Méthodes et paramètres retenus pour les analyses FORM :

- ❑ Analyses fiabilistes avec l'algorithme d'Abdo-Rackwitz [Abdo & Rackwitz 1990] associée à une méthode "line-search" de 1er ordre
- ❑ Critères de convergence : - fiabilité : $|G(x_{k+1}) / G(x_0)| \leq 10^{-4}$ $|\beta_{k+1} - \beta_k| \leq 10^{-3}$
- E.F. : norme des forces résiduelles $< 10^{-5}$



4 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

➤ Comparaison des chargements aléatoires et stochastiques :



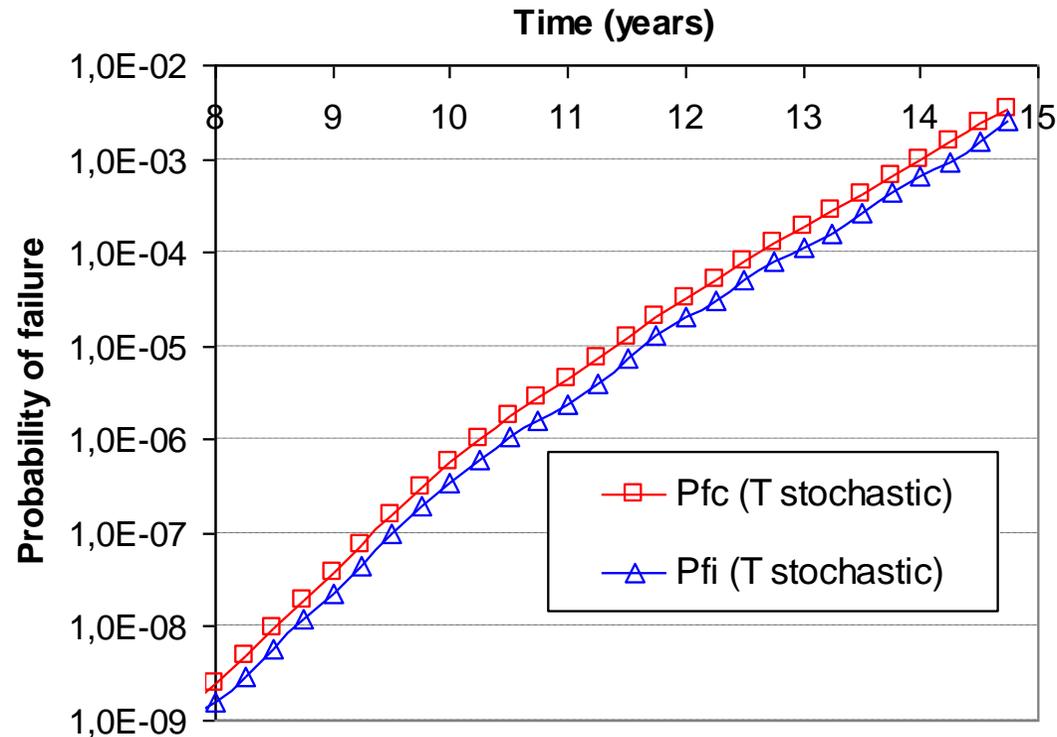
➤ Adéquation des évolutions avec l'intuition physique :

- plus on est proche de la fin de la protection de la peinture, moins la façon de prendre en compte le chargement a une influence
- Hétérogénéités induites par la corrosion augmentées par les pics de chargement



4 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

- Résultats obtenus avec chargement stochastique :



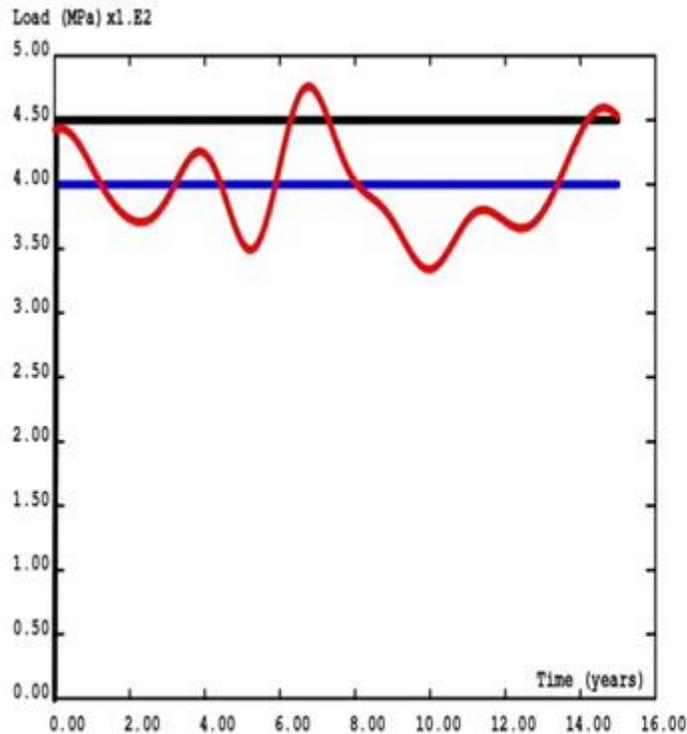
- Sur-évaluation d'environ 40% de $P_{f,c}$ par rapport à $P_{f,i}$: Précision insuffisante de la méthode ?



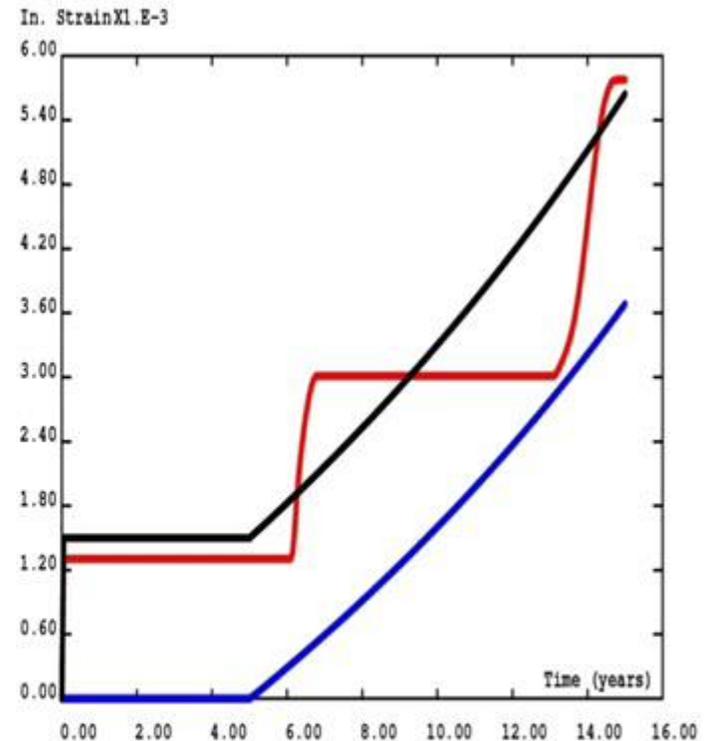


4 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

- Problèmes numériques induits par l'élasto-plasticité :



Load (MPa)



Max. eq. plastic strain

— char. constant 450MPa, — char. constant 400MPa, — trajectoire char. stochastique (moy 400MPa)





5 – Conclusions & perspectives

- Mise en oeuvre du couplage facilitée par l'utilisation de Cast3M®
- Validation d'une nouvelle approche permettant de prendre en compte les effets en temps et en espace de la corrosion, dans le cadre d'un couplage entre fiabilité fonction du temps et éléments finis non-linéaires :
 - ❑ Re-maillage structure non nécessaire
 - ❑ Influence chargement stochastique / chargement aléatoire
 - ❑ Amélioration de la méthode en cours:
 - Modélisation stochastique plus réaliste des paramètres d'évolution de la corrosion
 - Diminution du coût calcul
 - => en adaptant la discrétisation temporelle à l'évolution de la corrosion
 - => en mettant à jour la matrice de rigidité en fonction de l'épaisseur
- Prise en compte de multiples sites de corrosion...



A1 – Méthode EOLE

Principe de discrétisation d'un processus stochastique par EOLE
(Expansion Optimal Linear Estimation, [Li & Der Kiureghian 1995])

$$X(t, \omega) \approx m_X(t) + \sigma_X(t) \cdot \sum_{i=1}^r \frac{\xi_i(\omega)}{\sqrt{\lambda_i}} \phi_i^T C_{t,t_i}(t)$$

Intervalle de temps $[0, T]$ discrétisé en N

points $t_{i,j=1..N}$

m_X : moyenne du processus

σ_X : écart-type

$\xi_i(\omega)$: variables aléatoires gaussiennes

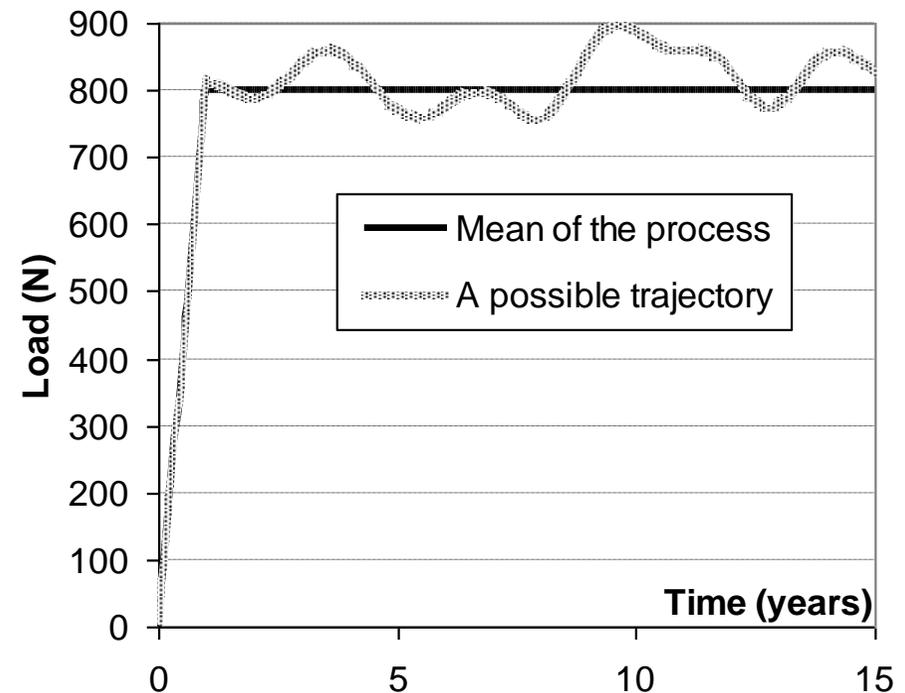
centrées réduites indépendantes

(λ_i, ϕ_i) : valeurs propres et vecteurs propres

de la matrice de corrélation C

$C_{t,t_j}(t) = \rho_{XX}(t,t_j), i=1..N$

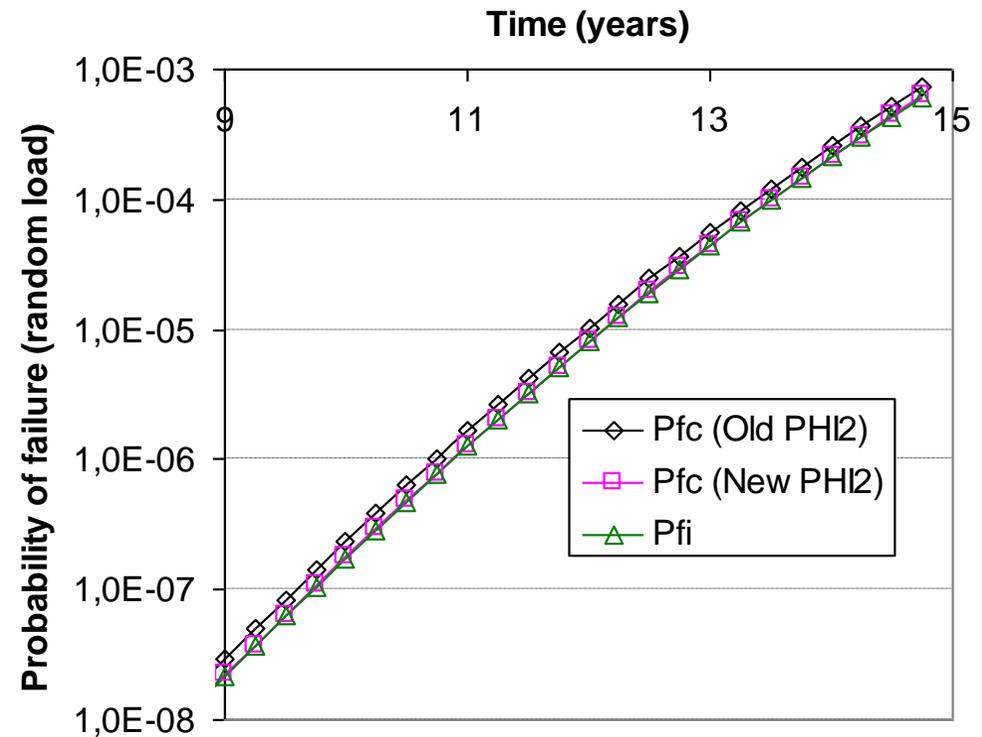
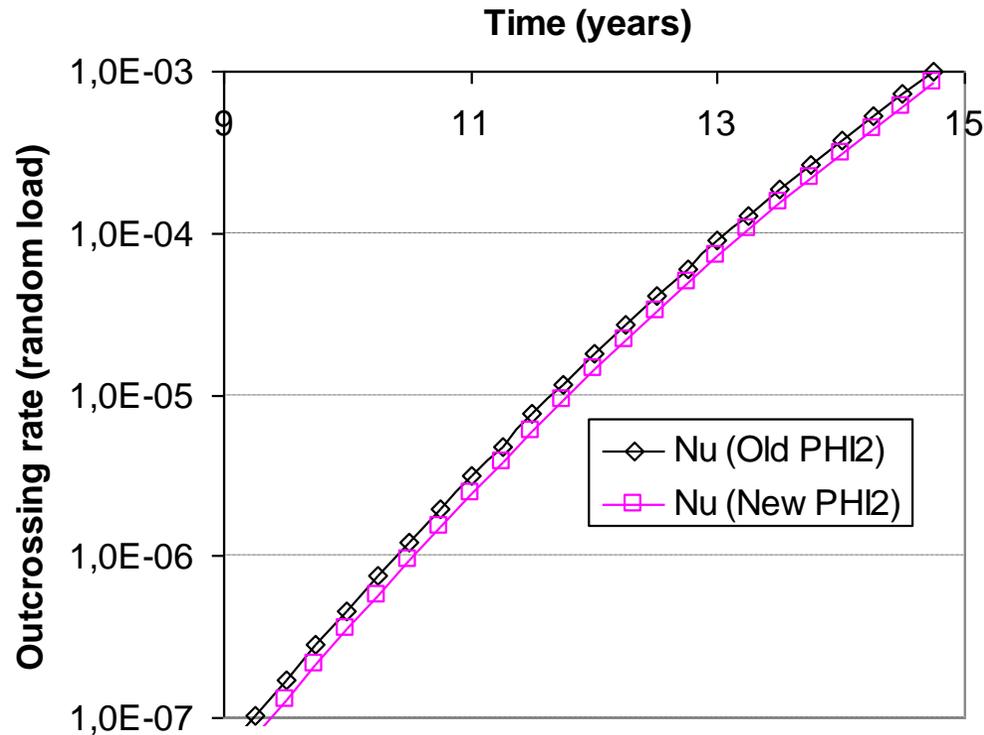
r : ordre d'expansion ($r \leq N$)





A2 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

➤ Résultats obtenus avec chargement aléatoire :

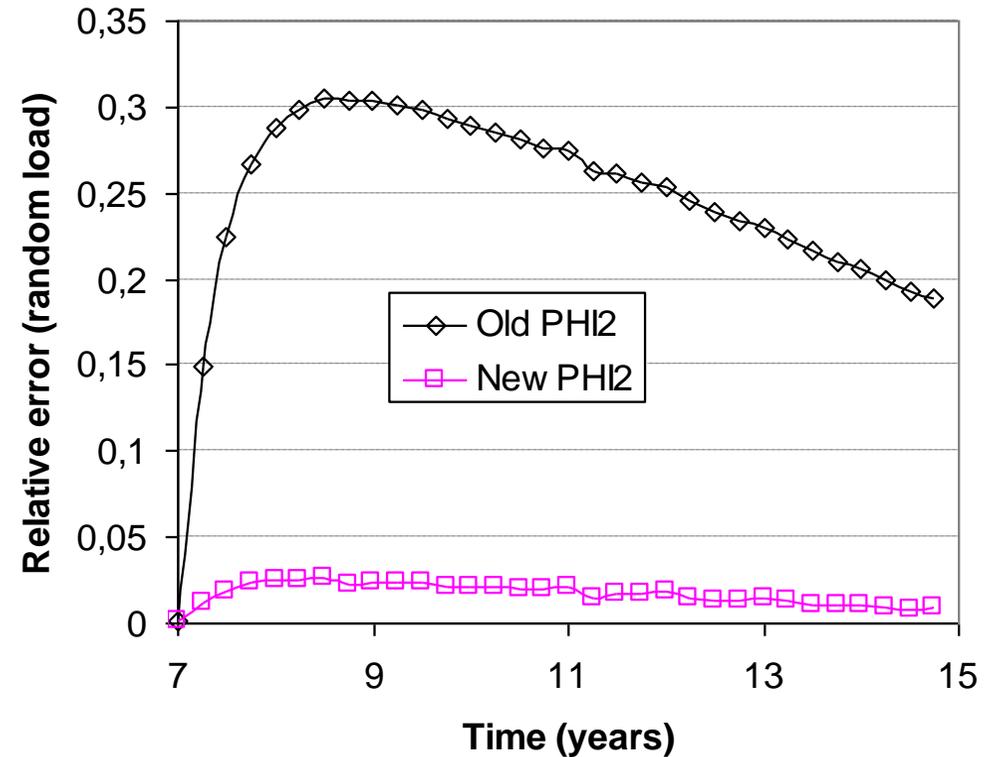




A2 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

- Résultats obtenus avec chargement aléatoire :

$$err_{P_f}(t) = \frac{P_{f,c}(t) - P_{f,i}(t)}{\text{moy}(P_{f,c}(t); P_{f,i}(t))}$$



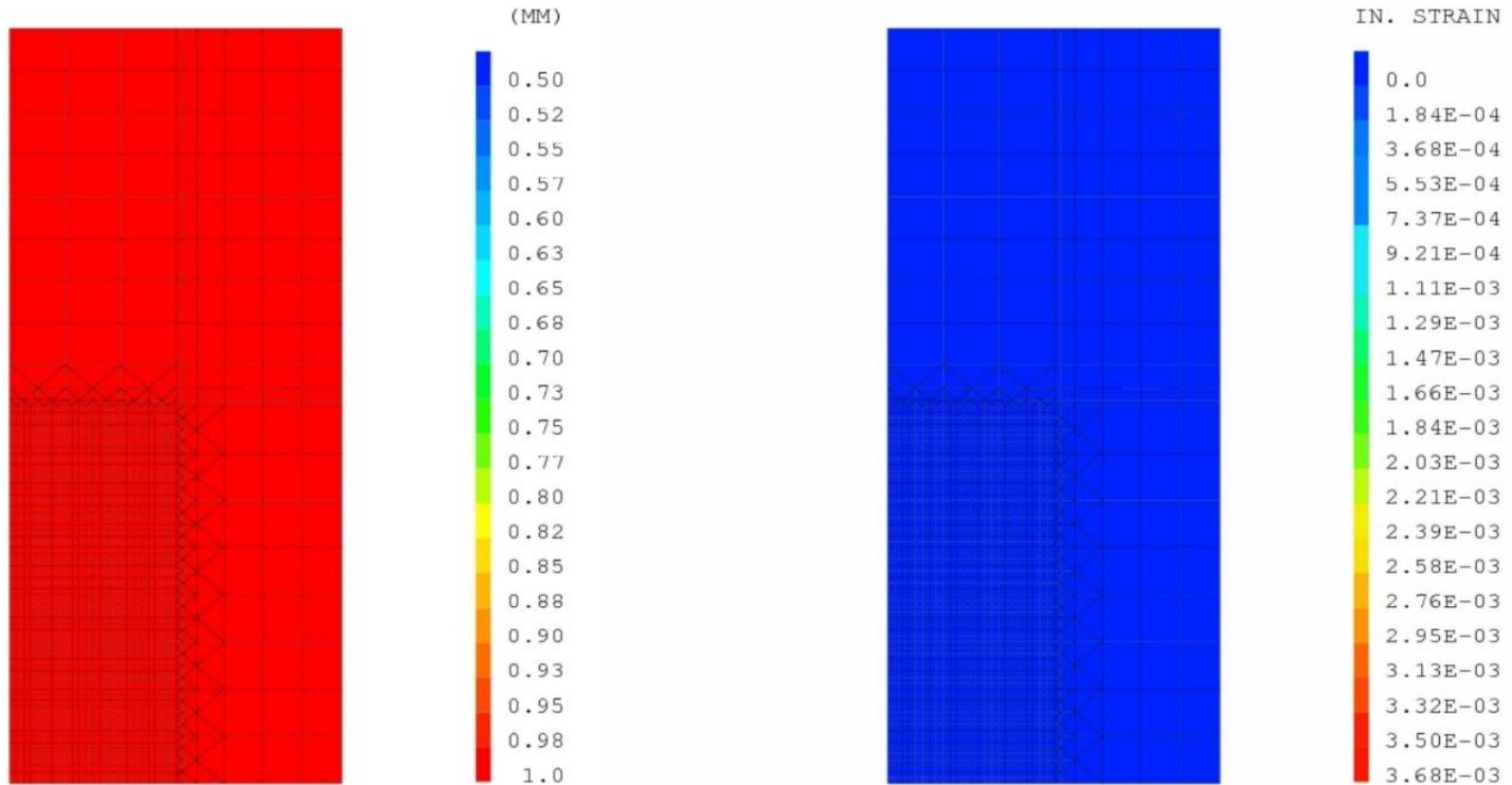
- Sur-évaluation de la probabilité de défaillance cumulée avec l'ancienne méthode PHI2





3 – Prise en compte des effets de corrosion en EF NL 2D

- Exemple de calcul non-linéaire avec variation de l'épaisseur :



THICKNESS AT TIME T = 0.0 YEARS

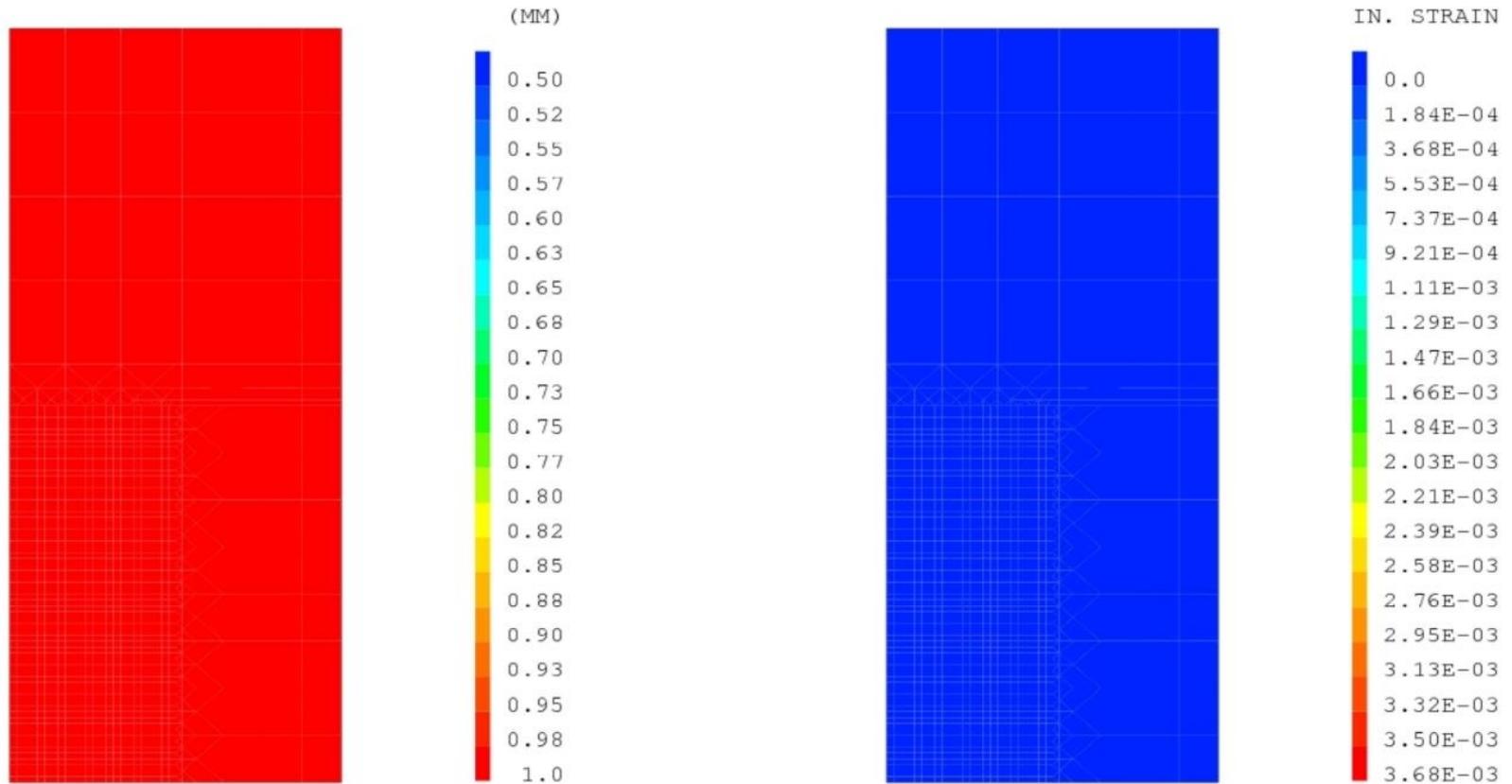
CUMULATIVE PLASTIC STRAIN AT T = 0.0 YEARS





3 – Prise en compte des effets de corrosion en EF NL 2D

- Exemple de calcul non-linéaire avec variation de l'épaisseur :



THICKNESS AT TIME T = 2.5 YEARS

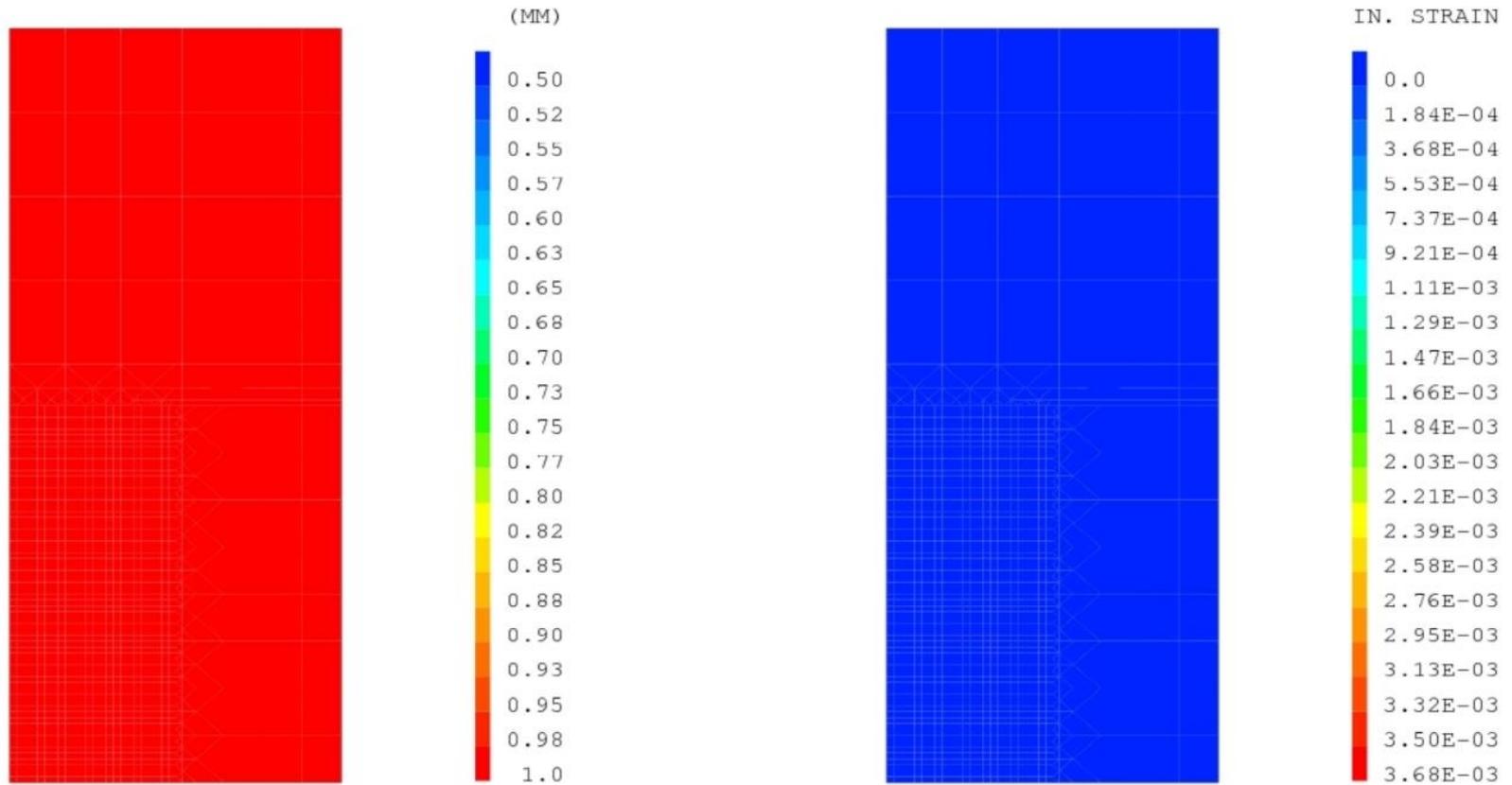
CUMULATIVE PLASTIC STRAIN AT T = 2.5 YEARS





3 – Prise en compte des effets de corrosion en EF NL 2D

- Exemple de calcul non-linéaire avec variation de l'épaisseur :



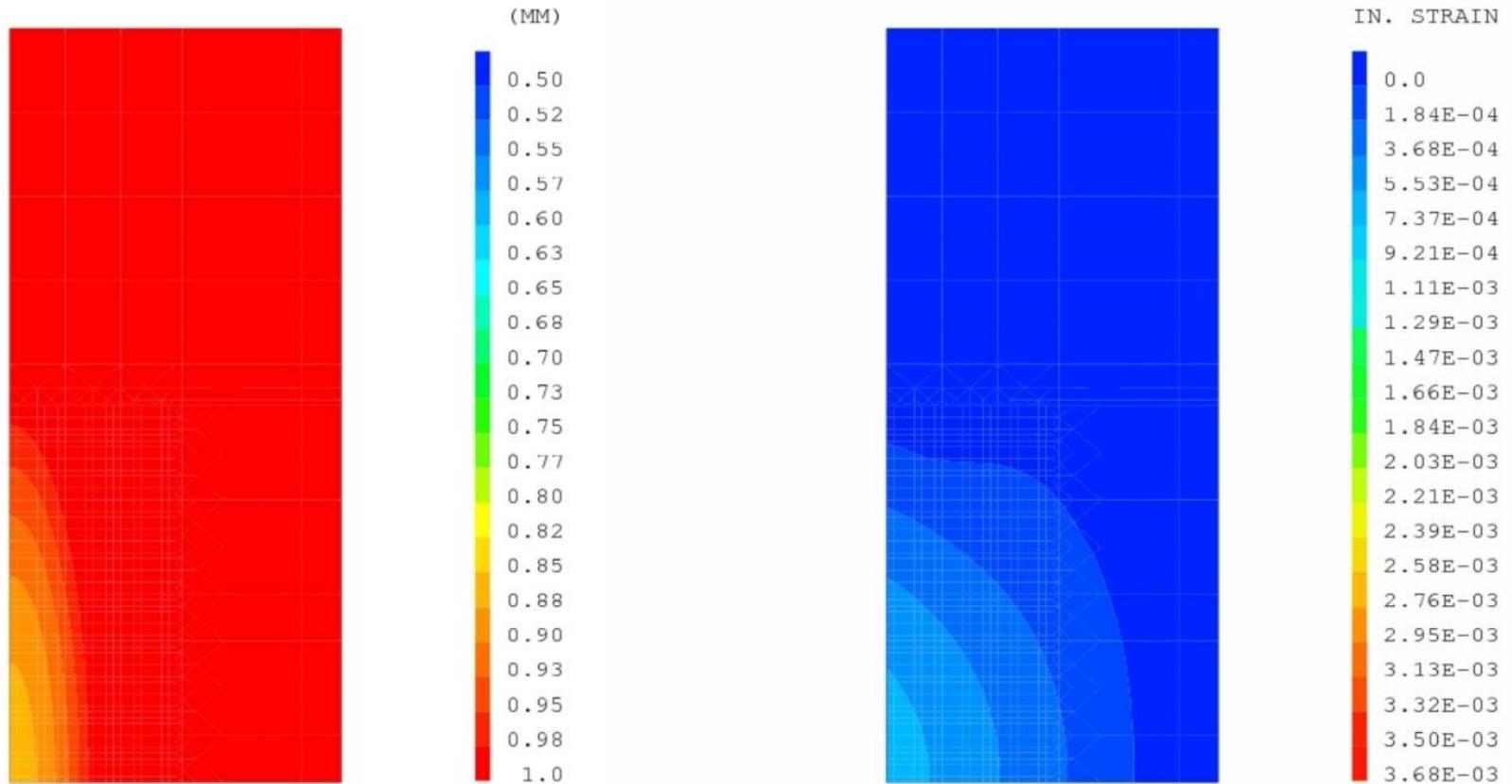
THICKNESS AT TIME T = 5.0 YEARS

CUMULATIVE PLASTIC STRAIN AT T = 5.0 YEARS



3 – Prise en compte des effets de corrosion en EF NL 2D

- Exemple de calcul non-linéaire avec variation de l'épaisseur :



THICKNESS AT TIME T = 7.5 YEARS

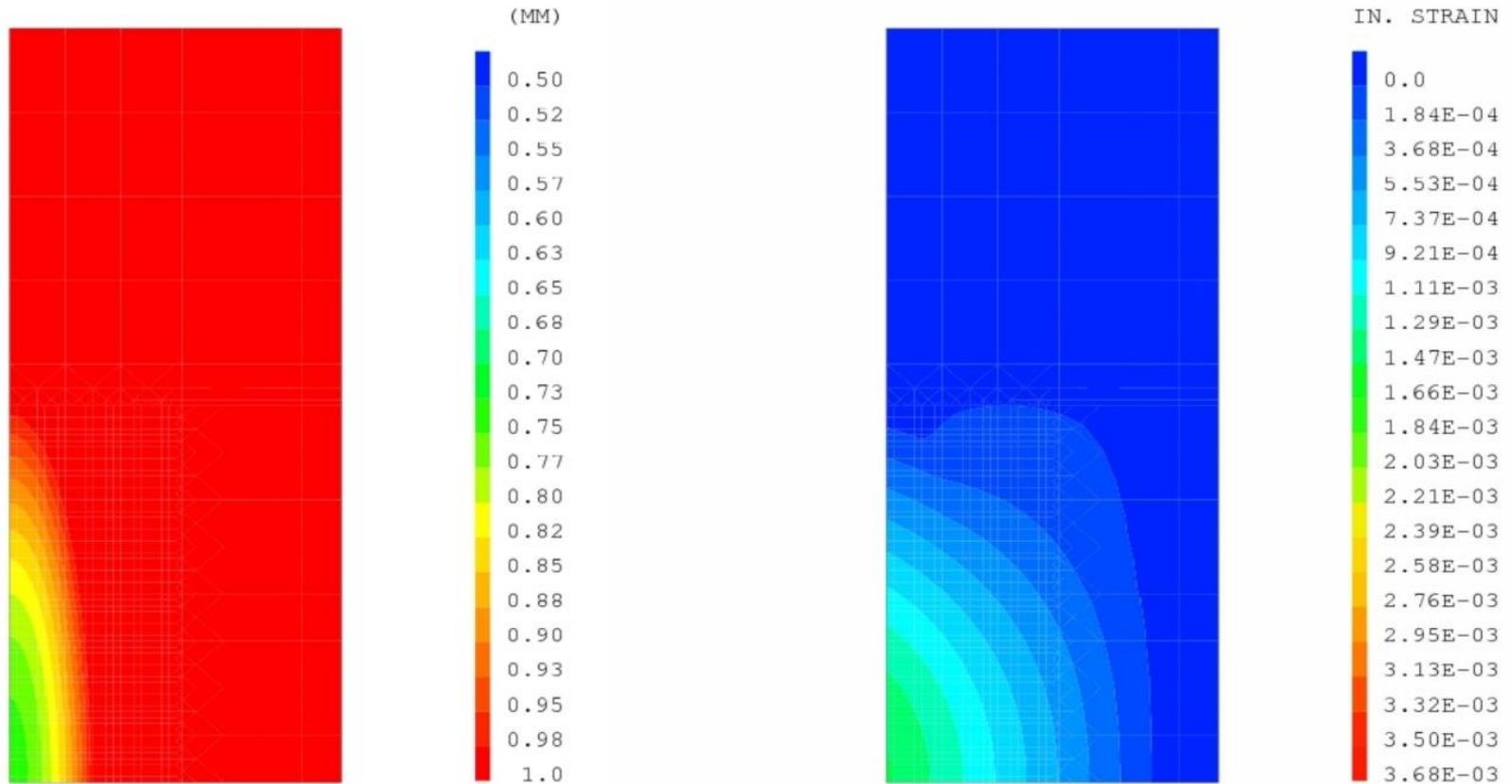
CUMULATIVE PLASTIC STRAIN AT T = 7.5 YEARS





3 – Prise en compte des effets de corrosion en EF NL 2D

- Exemple de calcul non-linéaire avec variation de l'épaisseur :



THICKNESS AT TIME T = 10.0 YEARS

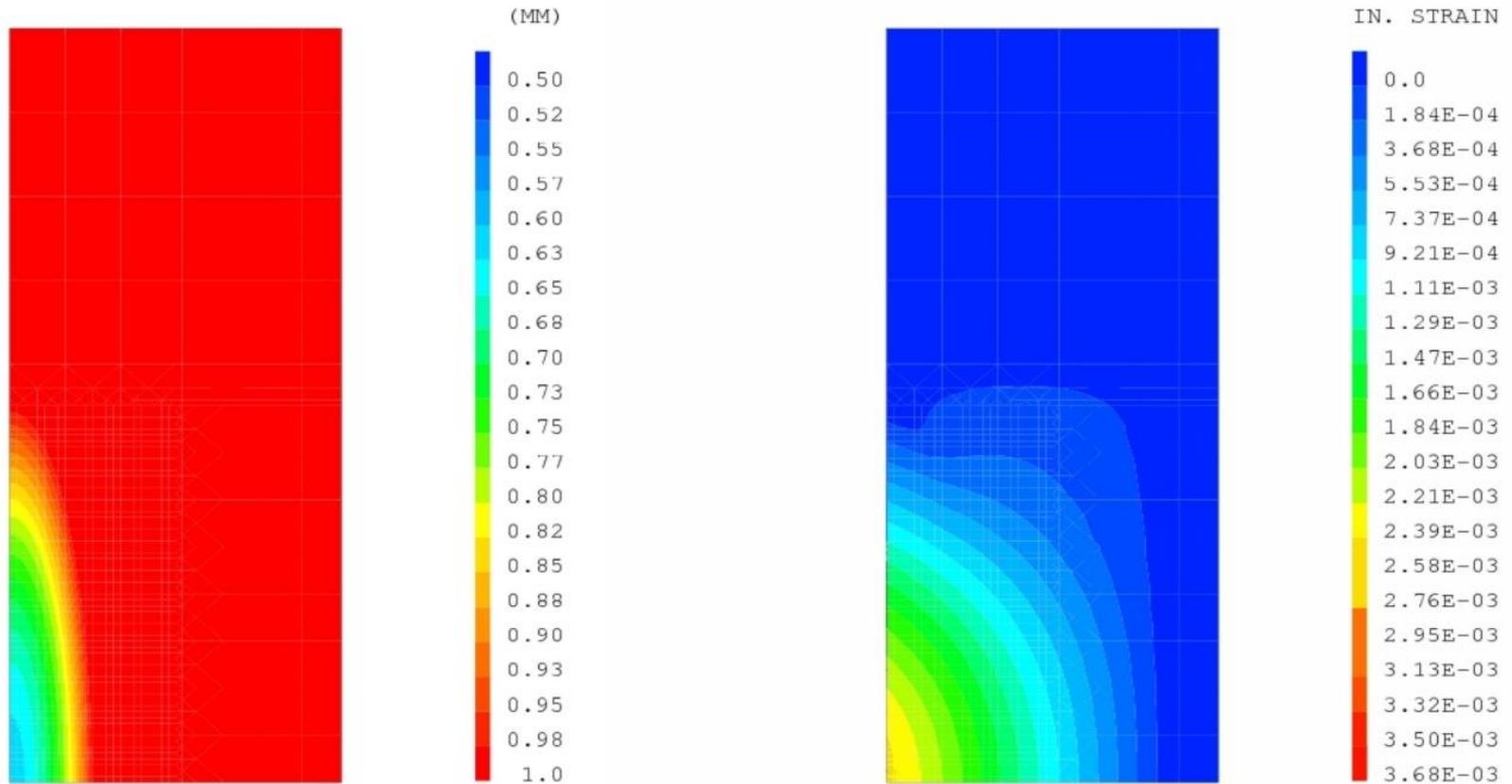
CUMULATIVE PLASTIC STRAIN AT T = 10.0 YEARS





3 – Prise en compte des effets de corrosion en EF NL 2D

- Exemple de calcul non-linéaire avec variation de l'épaisseur :



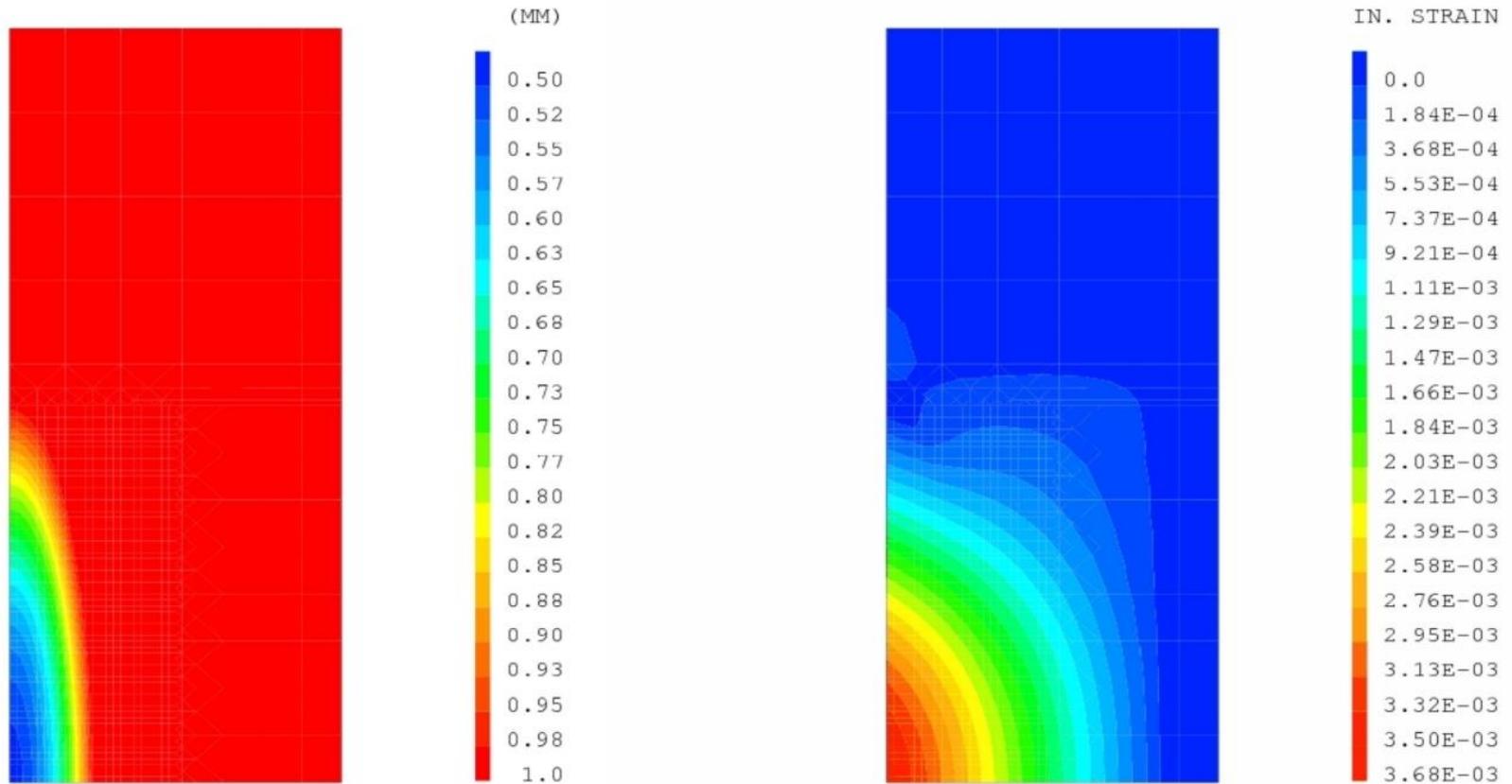
THICKNESS AT TIME T = 12.5 YEARS

CUMULATIVE PLASTIC STRAIN AT T = 12.5 YEARS



3 – Prise en compte des effets de corrosion en EF NL 2D

➤ Exemple de calcul non-linéaire avec variation de l'épaisseur :



THICKNESS AT TIME T = 15.0 YEARS

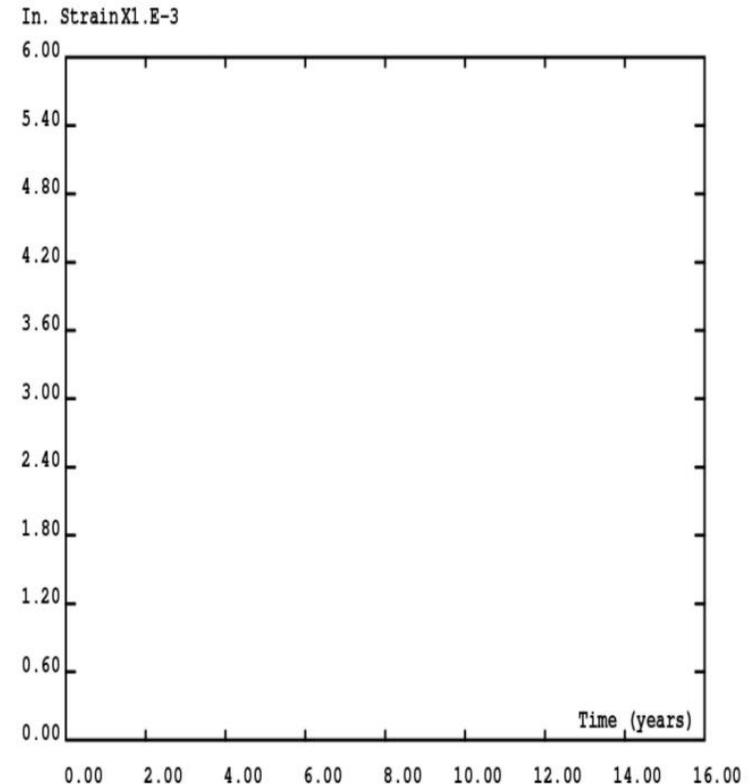
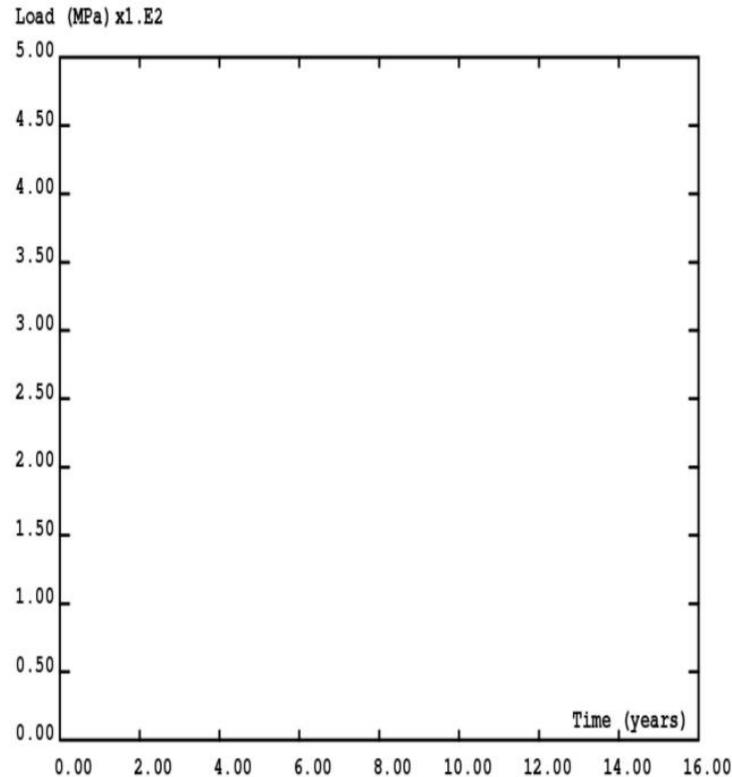
CUMULATIVE PLASTIC STRAIN AT T = 15.0 YEARS





4 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

➤ Problèmes numériques induits par l'élasto-plasticité :



Load (MPa)

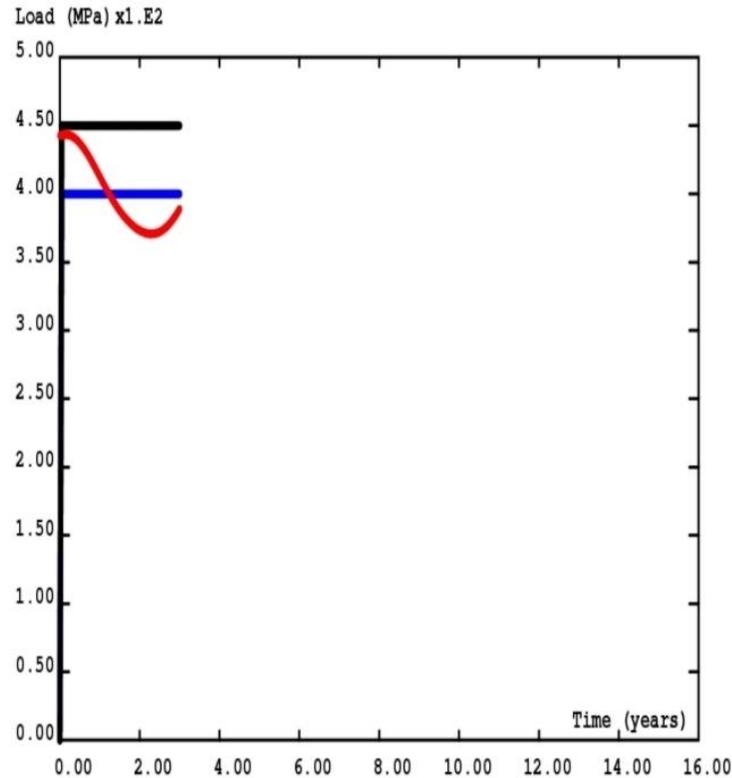
— char. constant 450MPa, — char. constant 400MPa, — trajectoire char. stochastique (moy 400MPa)

Max. eq. plastic strain



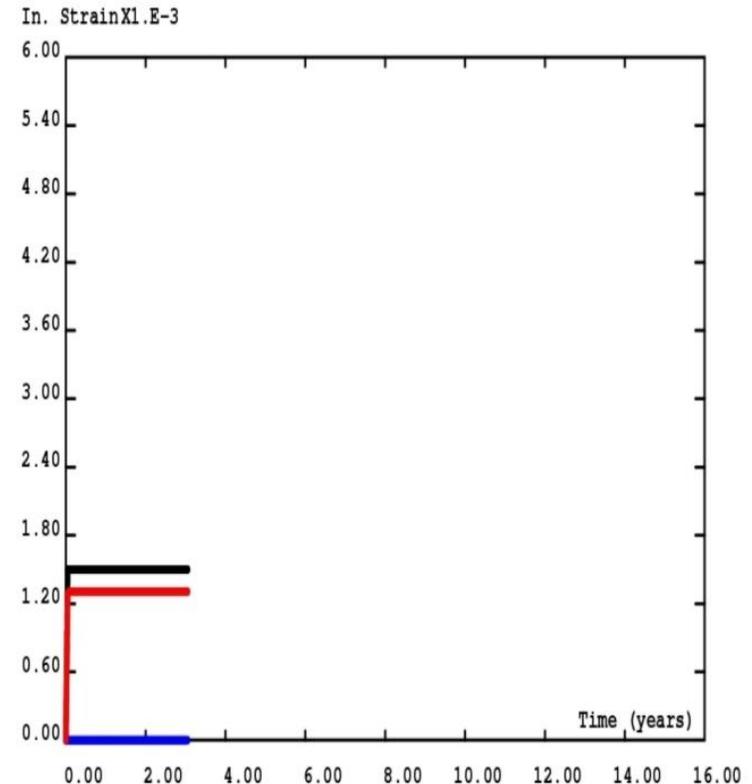
4 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

➤ Problèmes numériques induits par l'élasto-plasticité :



Load (MPa)

— char. constant 450MPa, — char. constant 400MPa, — trajectoire char. stochastique (moy 400MPa)

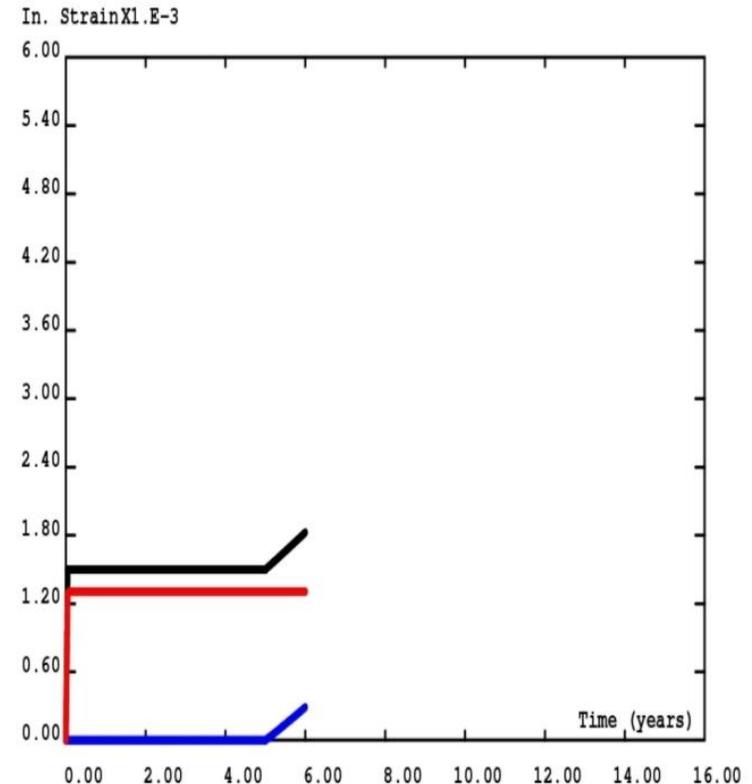
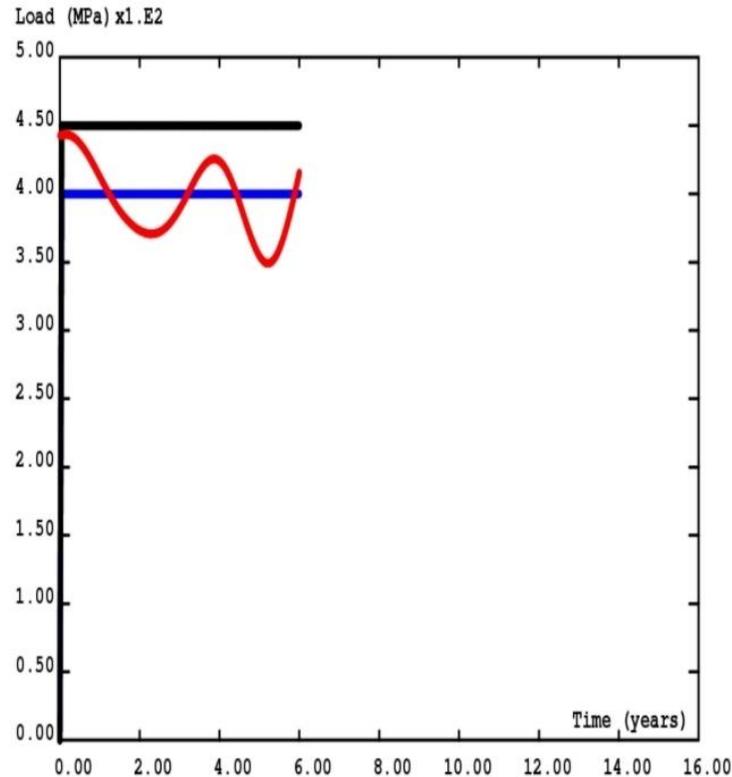


Max. eq. plastic strain



4 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

➤ Problèmes numériques induits par l'élasto-plasticité :



Load (MPa)

— char. constant 450MPa, — char. constant 400MPa, — trajectoire char. stochastique (moy 400MPa)

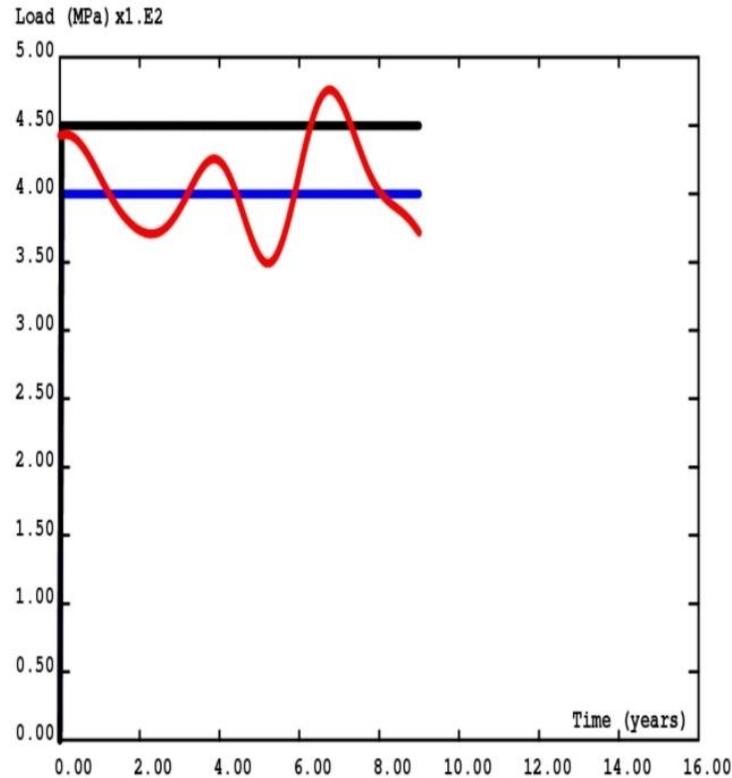
Max. eq. plastic strain





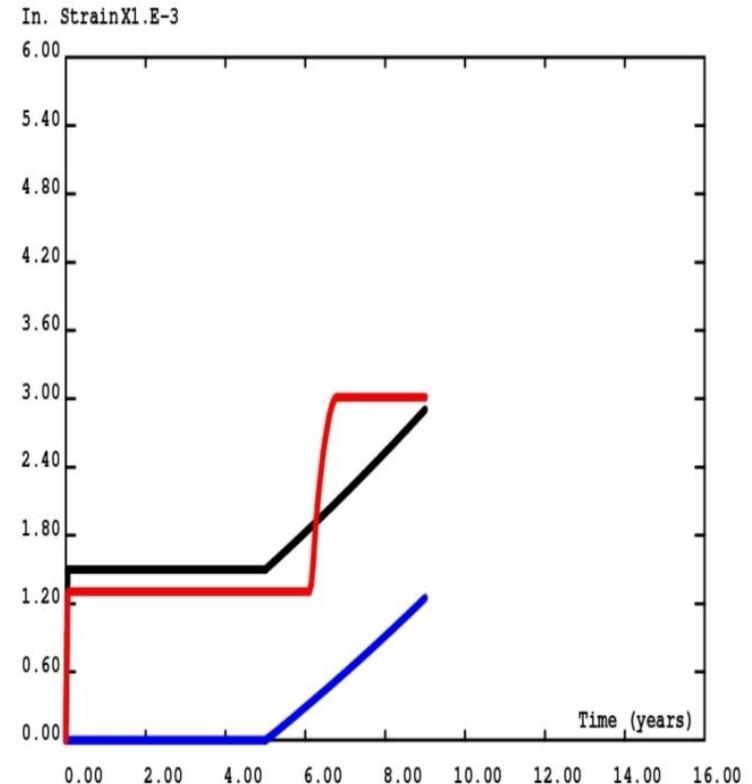
4 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

- Problèmes numériques induits par l'élasto-plasticité :



Load (MPa)

— char. constant 450MPa, — char. constant 400MPa, — trajectoire char. stochastique (moy 400MPa)

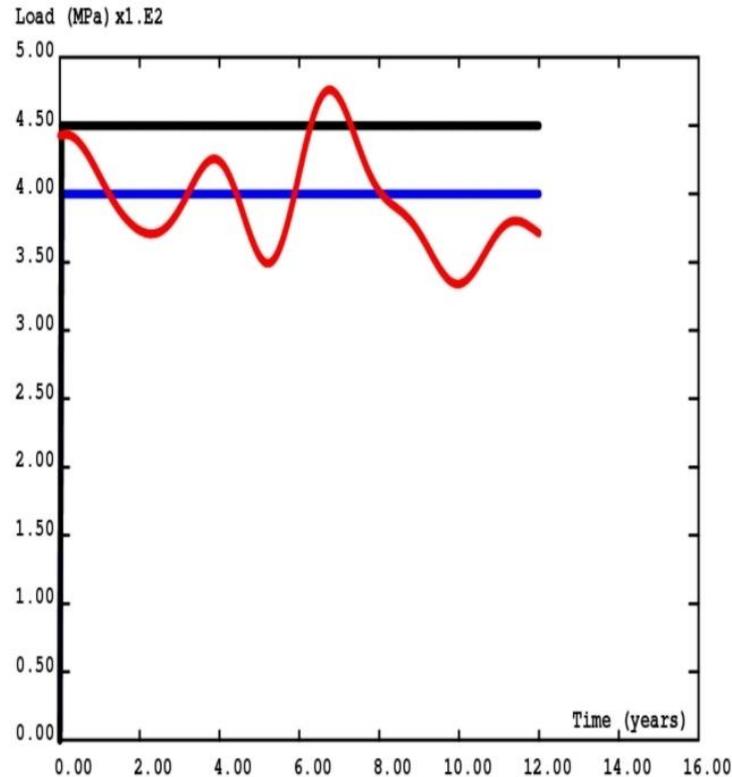


Max. eq. plastic strain



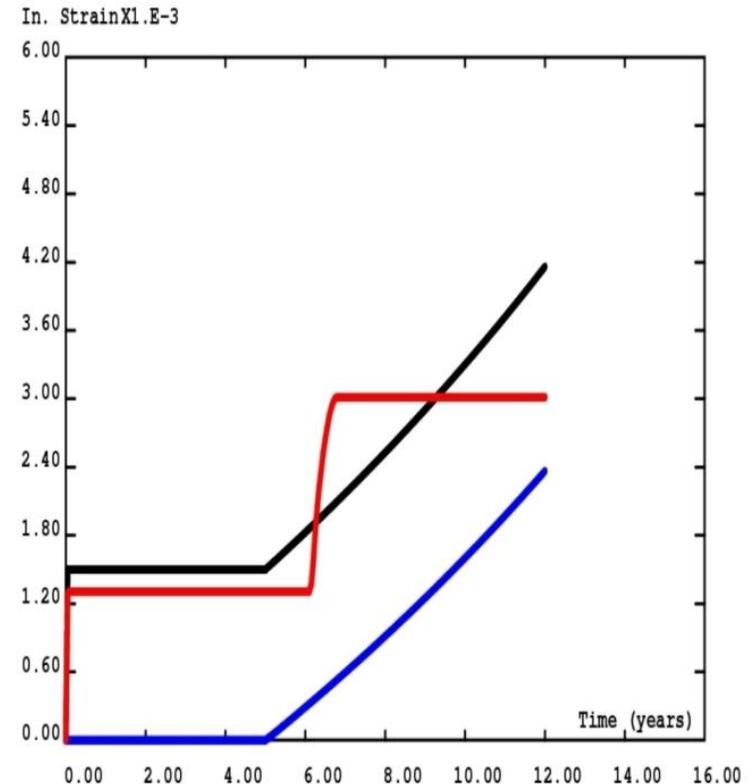
4 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

➤ Problèmes numériques induits par l'élasto-plasticité :



Load (MPa)

— char. constant 450MPa, — char. constant 400MPa, — trajectoire char. stochastique (moy 400MPa)

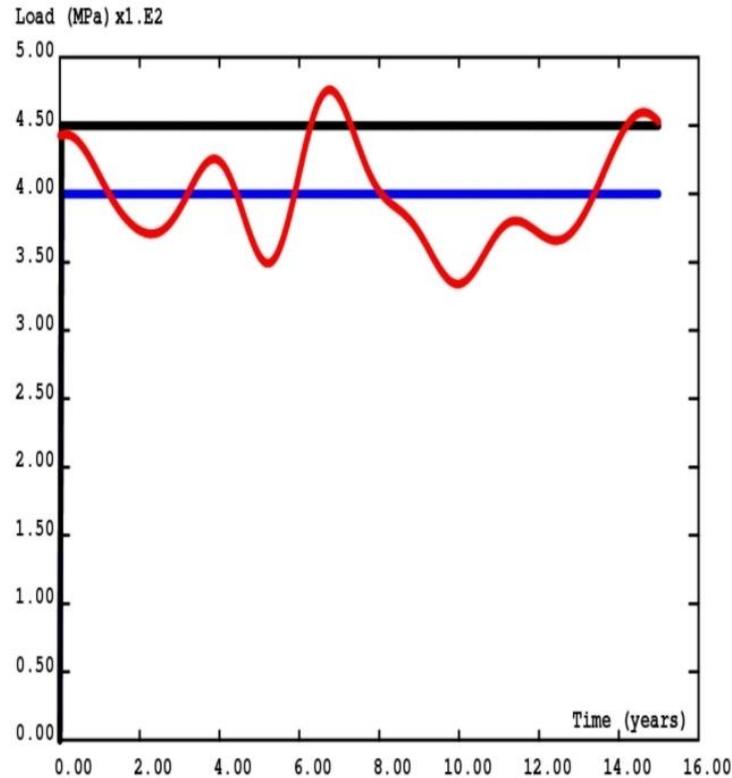


Max. eq. plastic strain



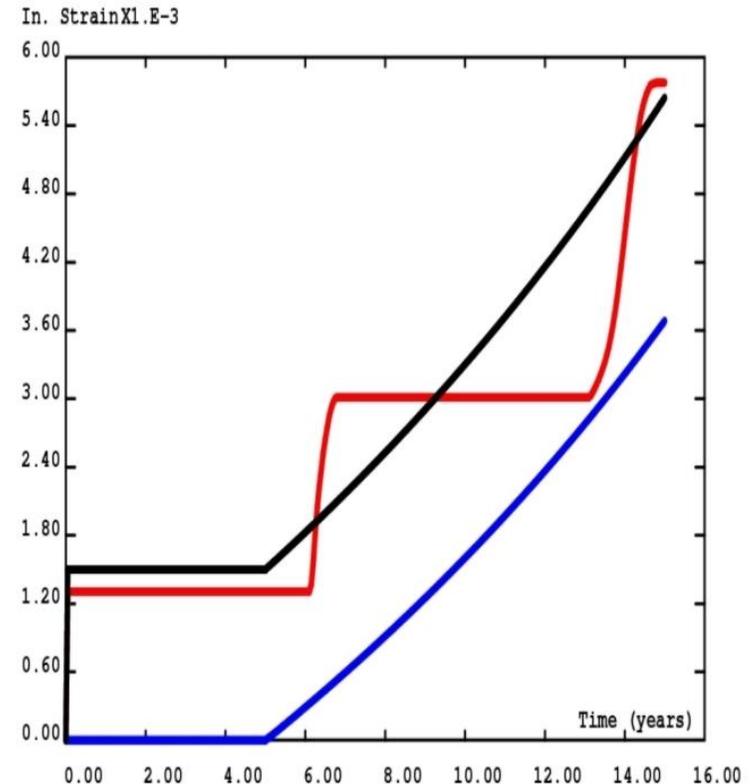
4 – Couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps

➤ Problèmes numériques induits par l'élasto-plasticité :



Load (MPa)

— char. constant 450MPa, — char. constant 400MPa, — trajectoire char. stochastique (moy 400MPa)



Max. eq. plastic strain

