

8<sup>èmes</sup> Journées

Fiabilité des  
MATÉRIAUX & DES STRUCTURES

Aix-en-Provence,  
9 et 10 avril 2014



ECOSYSTEMES CONTINENTAUX  
ECCOREV  
ET RISQUES ENVIRONNEMENTAUX



# Effets de la variabilité spatiale de l'agressivité du sol sur la fiabilité des pipelines enterrés soumis à la corrosion

Yacine Sahraoui\*<sup>-\*\*</sup>, Alaa Chateauneuf\*\*<sup>\*</sup>, Rabia Khelif\*

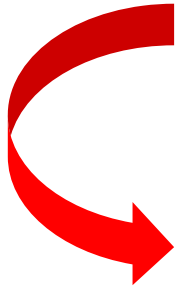
\* Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie

\*\* Université Blaise Pascal, Institut Pascal, France



# Objectif

- ❑ **Elaborer une stratégie optimale de maintenance et d'inspection.**



- **Quels sont les risques associés aux ouvrages en service ?**
- **Quelles sont les actions optimales à planifier pour maîtriser ces risques ?**

# Gazoduc trans-saharien

Extensions / Nouvelles routes

Terminal de Départ :  
Brass Delta du Nigeria

Terminal d'Arrivée :  
Beni Saf ou El Kala

**Longueur: 4188km**

Algérie: 2310Km

Niger: 841Km

Nigeria: 1037Km



Gas deliveries



Source SONATRAC TRC

# Besoins et durée de vie

## ➤ RESEAU EXISTANT

- ✓ 15 000 Km en Algérie, 25000 km vers 2015
- ✓ Sols et conditions de chargements ne sont pas les mêmes
- ✓ Coûts du planning d'inspection très élevés

## ➤ AUGMENTATION DE LA PRODUCTION

- ✓ Augmenter le diamètre
- ✓ Augmenter la pression de service

## ➤ MAINTENANCE DU RESEAU EXISTANT

- ✓ Gérer la vie du réseau en fonction de la corrosion et la fatigue
- ✓ Comment augmenter la disponibilité et la durée de vie du réseau?

## ➤ CONSIDERATION DES COÛTS DES DEFAILLANCES

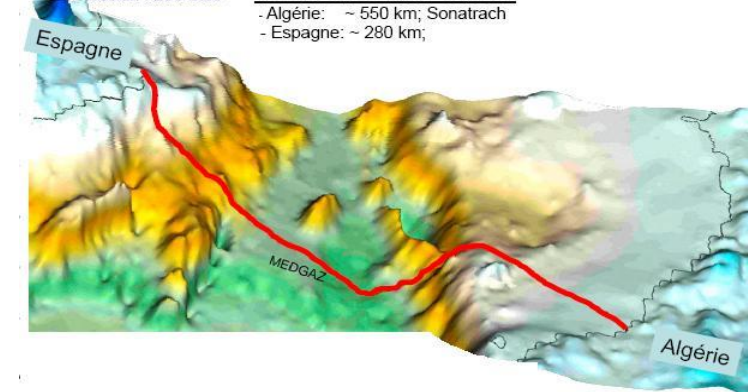
- ✓ Endommagements des installations (Explosion ...)
- ✓ Pertes humaines (accidents dans les zones rurales et urbaines)

### TRONCON SOUS-MARIN:

- Longueur: ~ 200 km
- Profondeur max: ~ 2 100 m
- Pression : 200 bars

### TRONCONS TERRESTRES:

- Algérie: ~ 550 km; Sonatrach
- Espagne: ~ 280 km;



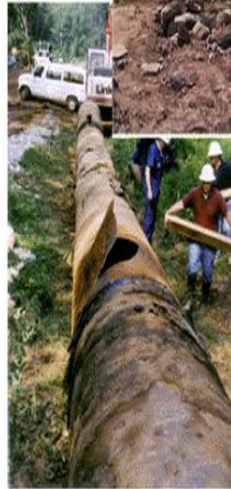
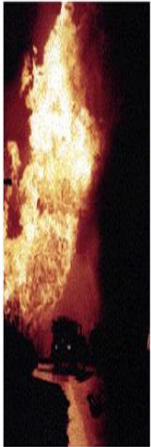
# Sommaire

- Causes et conséquences de défaillance des Pipelines
- Modèle probabiliste des pipelines corrodés
- Evaluation de la probabilité de défaillance
- Etude de cas
- Conclusion





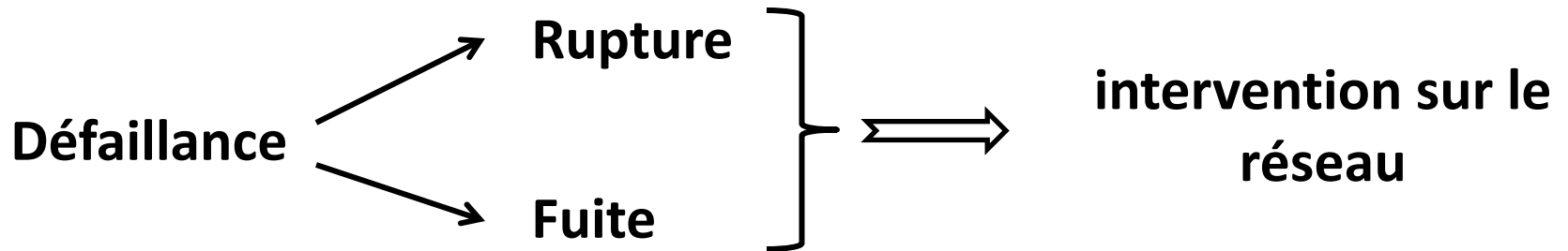
# Causes et conséquences de défaillance des Pipelines



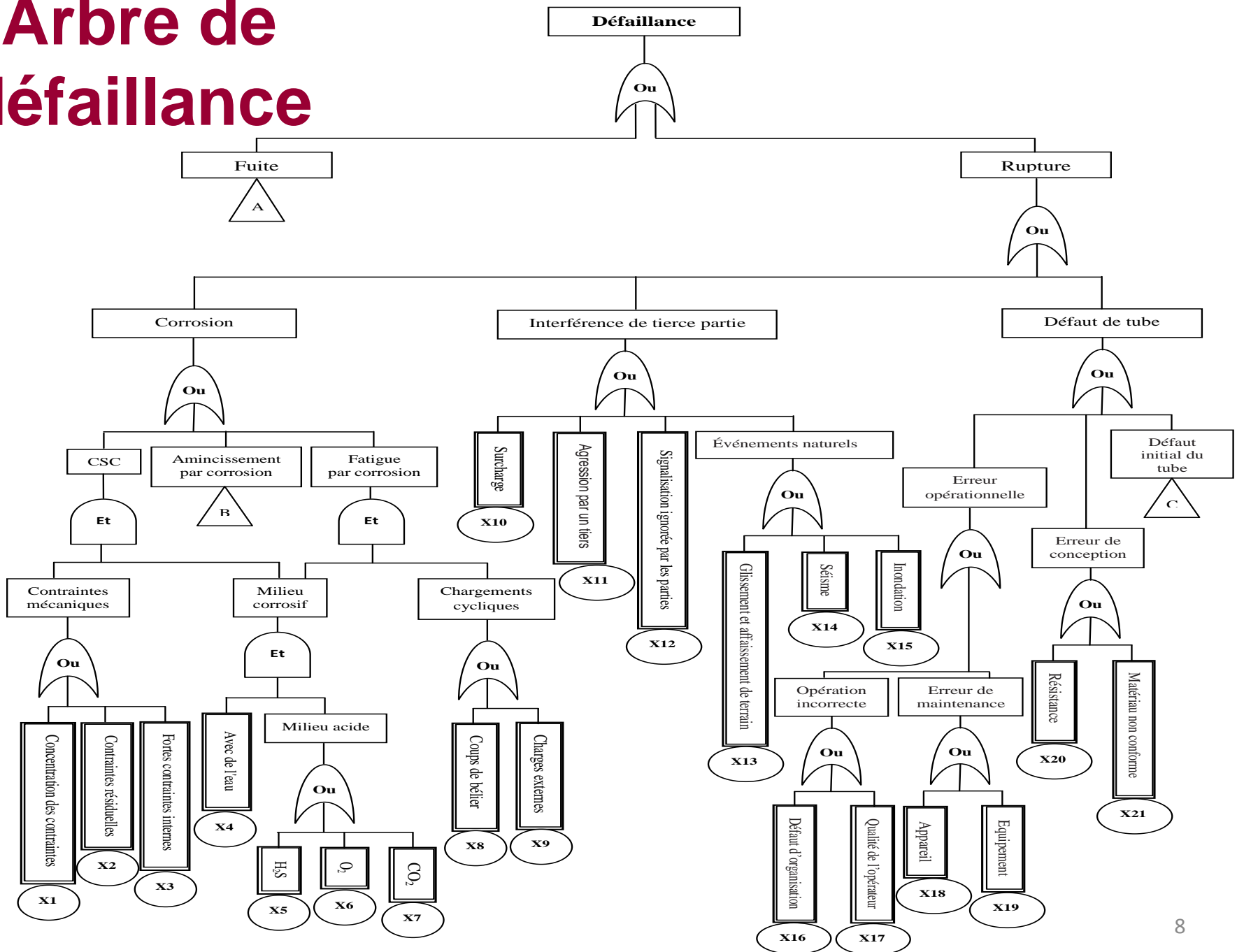
Images taken  
from OPS  
website:  
[ops.gov.com](http://ops.gov.com)

# Analyse des causes de défaillance d'un gazoduc enterré

Défaillance dans les pipelines?

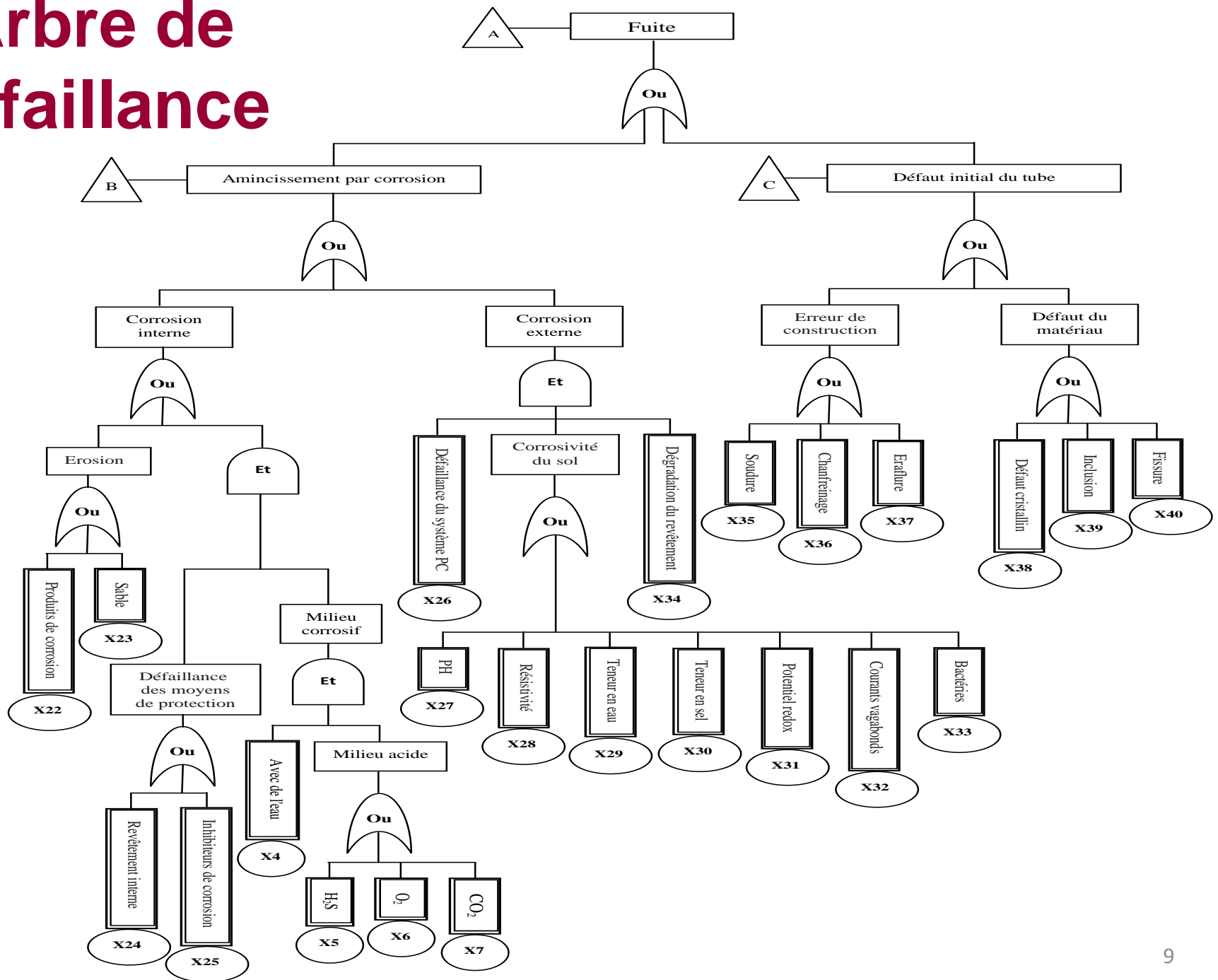


# Arbre de défaillance





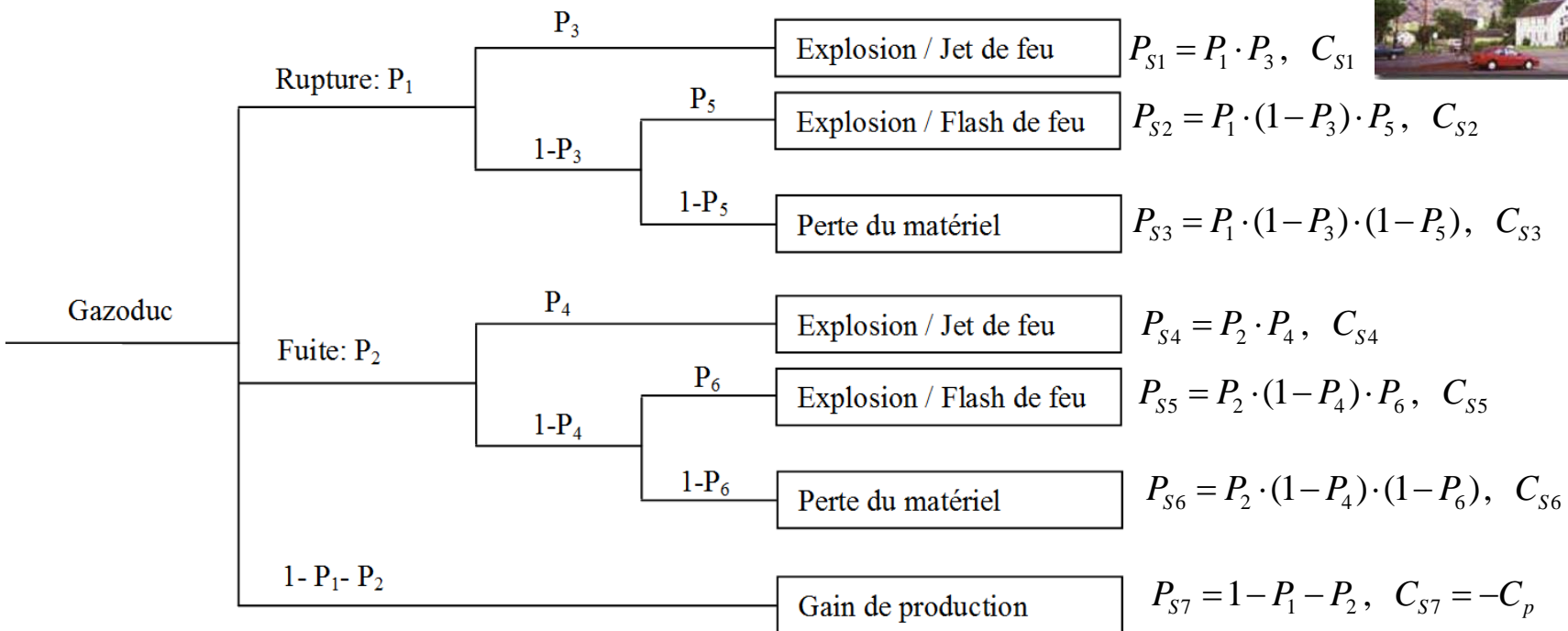
# Arbre de défaillance



# Analyse des Conséquences de défaillances d'un gazoduc



Mise en service du pipeline	L'apparition de l'état critique	Ignition immédiate	Ignition retardée	Scénario résultant
-----------------------------	---------------------------------	--------------------	-------------------	--------------------

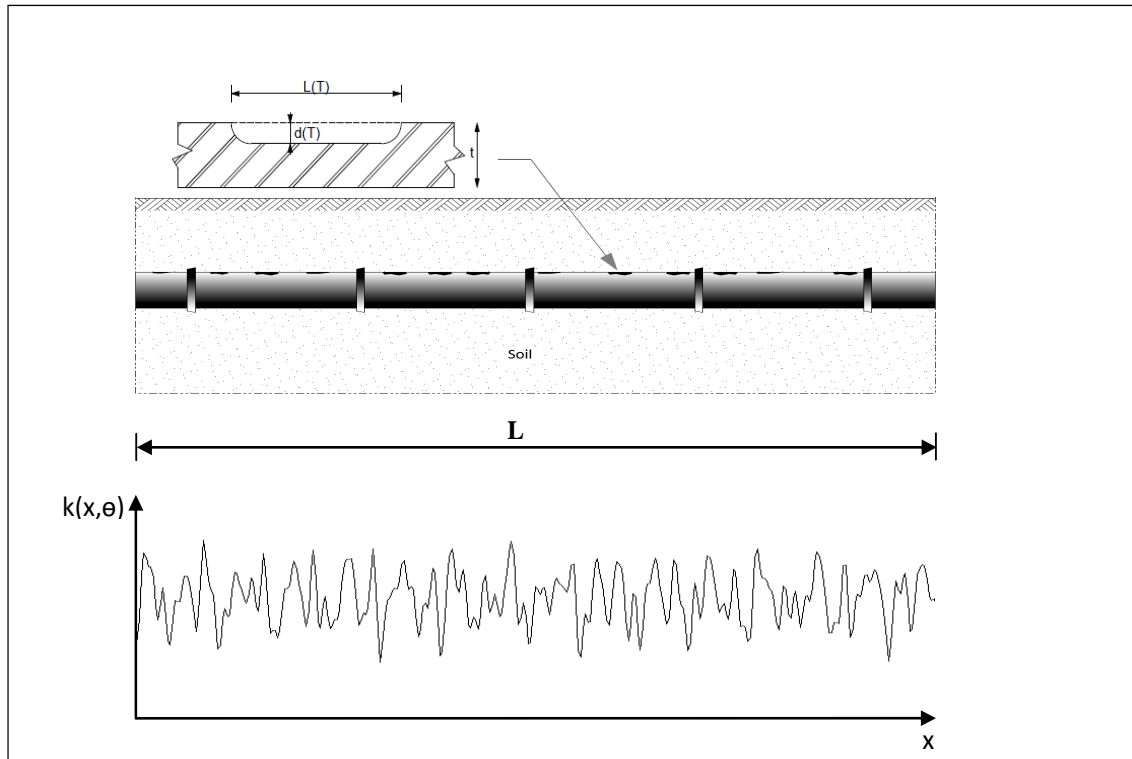


$$\text{Risque}_{\text{Total}} = \sum_{i=1}^n C_{si} \cdot P_{Si} \Rightarrow \text{Risque}_{\text{Total}} = C_{S1} \cdot (P_1 \cdot P_3) + C_{S2} \cdot P_1 \cdot (1 - P_3) \cdot P_5 + C_{S3} \cdot P_1 \cdot (1 - P_3) \cdot (1 - P_5) + C_{S4} \cdot P_2 \cdot P_4 + C_{S5} \cdot P_2 \cdot (1 - P_4) \cdot P_6 + C_{S6} \cdot P_2 \cdot (1 - P_4) \cdot (1 - P_6) - C_p \cdot (1 - P_1 - P_2)$$



# Modèle probabiliste des pipelines corrodés

# Définition du système



$$d(T) = k(\vec{x}, \theta) T^n$$

$$L(T) = \gamma k(\vec{x}, \theta) T^n$$

$k, n \Rightarrow$  Propriétés du sol

$\vec{x}$ : variables spatiales

$\theta$ : variables stochastiques

$\gamma$ : le rapport entre  $L(T)$  et  $d(T)$

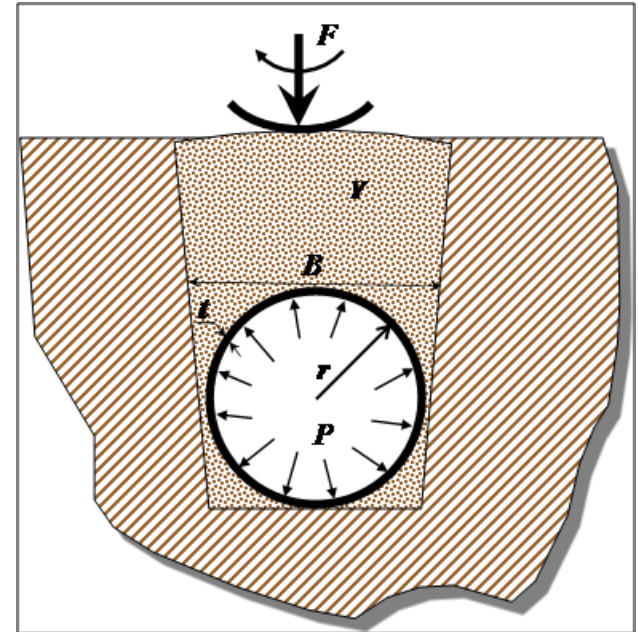
# Pression ultime du tuyau dégradé

**Pression ultime :**

$$p_r = 2(f_y + 68.95) \left( \frac{t}{D} \right) \left[ \frac{1 - \frac{d(T)}{t}}{1 - \frac{d(T)}{tM}} \right]$$

**Facteur de Folias :**

$$M = \begin{cases} \sqrt{1 + 0.6275 \frac{L(T)^2}{Dt} - 0.003375 \frac{L(T)^4}{D^2 t^2}}, & \text{for } \frac{L(T)^2}{Dt} \leq 50 \\ 0.0032 \frac{L(T)^2}{Dt} + 3.3, & \text{for } \frac{L(T)^2}{Dt} > 50 \end{cases}$$

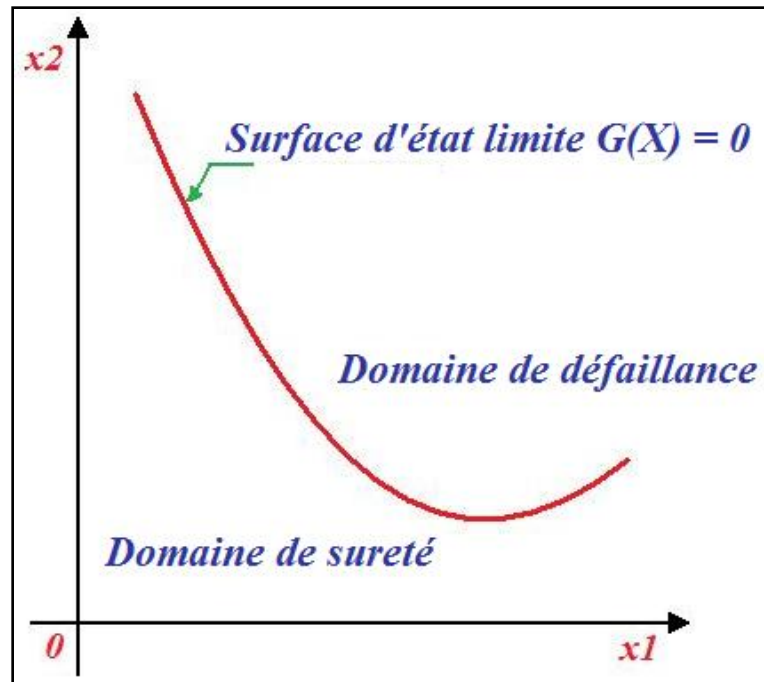




# Marge de sûreté

Marge de sûreté :

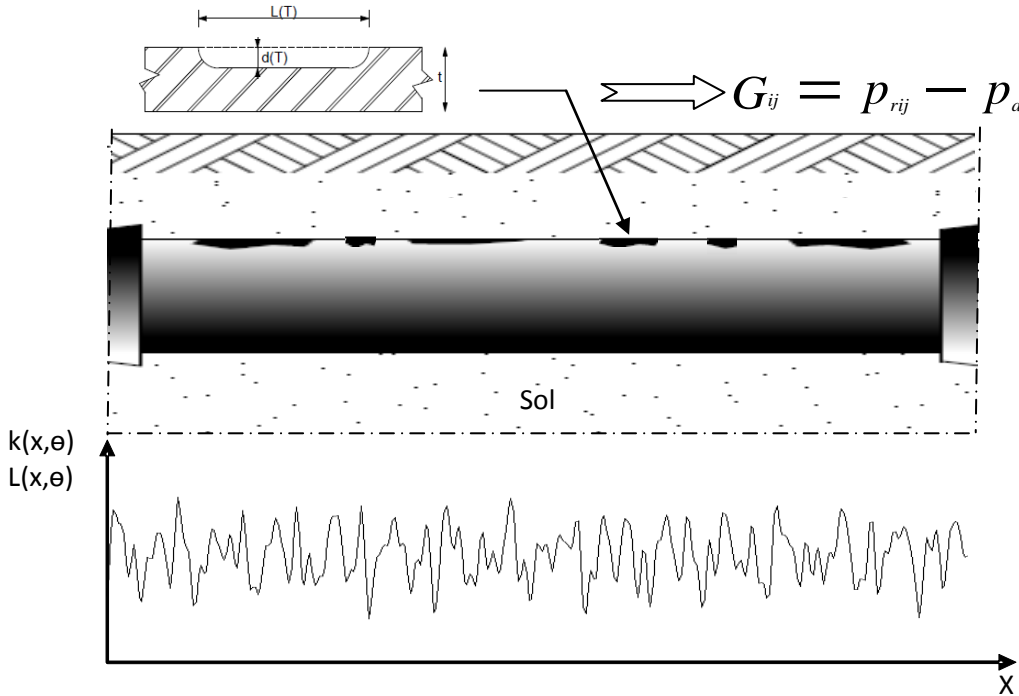
$$G = p_r - p_a$$





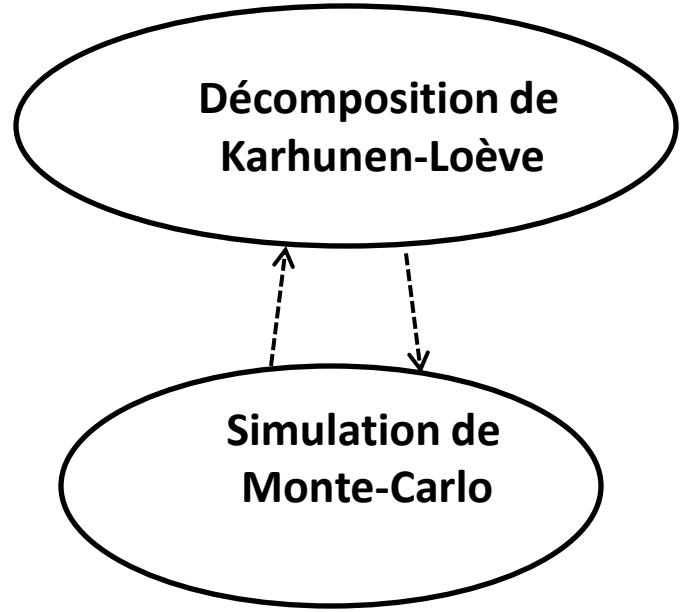
# Evaluation de la probabilité de défaillance

# Calcul de la probabilité de défaillance cumulée



$n$  : le nombre de segments  
 $m_i$  : le nombre de défauts  $j$  dans le segment  $i$

$$\left. \begin{aligned}
 P_{f\_segment} &= P\left(\bigcup_{j=1}^{m_i} [G_{ij} \leq 0]\right) \\
 P_{f\_système} &= P\left[\bigcup_{i=1}^n \left(\bigcup_{j=1}^{m_i} [G_{ij} \leq 0]\right)\right]
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$





# Cas d'application

# Variables du système

## Pipeline en acier de qualité : X52

Diamètre extérieur :  $D=600$  mm

Épaisseur de paroi nominale :  $t=12$  mm

Pression de service :  $P_a=10$  MPa

Limite d'élasticité nominale :  $f_y= 423$  MPa

## Types du sol

Sols argileux (C) :  $k = 0,178$  et  $n = 0,829$

Sols argile limoneux (CL) :  $k = 0,163$  et  $n = 0,793$

Limon sablo-argileux (SCL) :  $k = 0,144$  et  $n = 0,734$

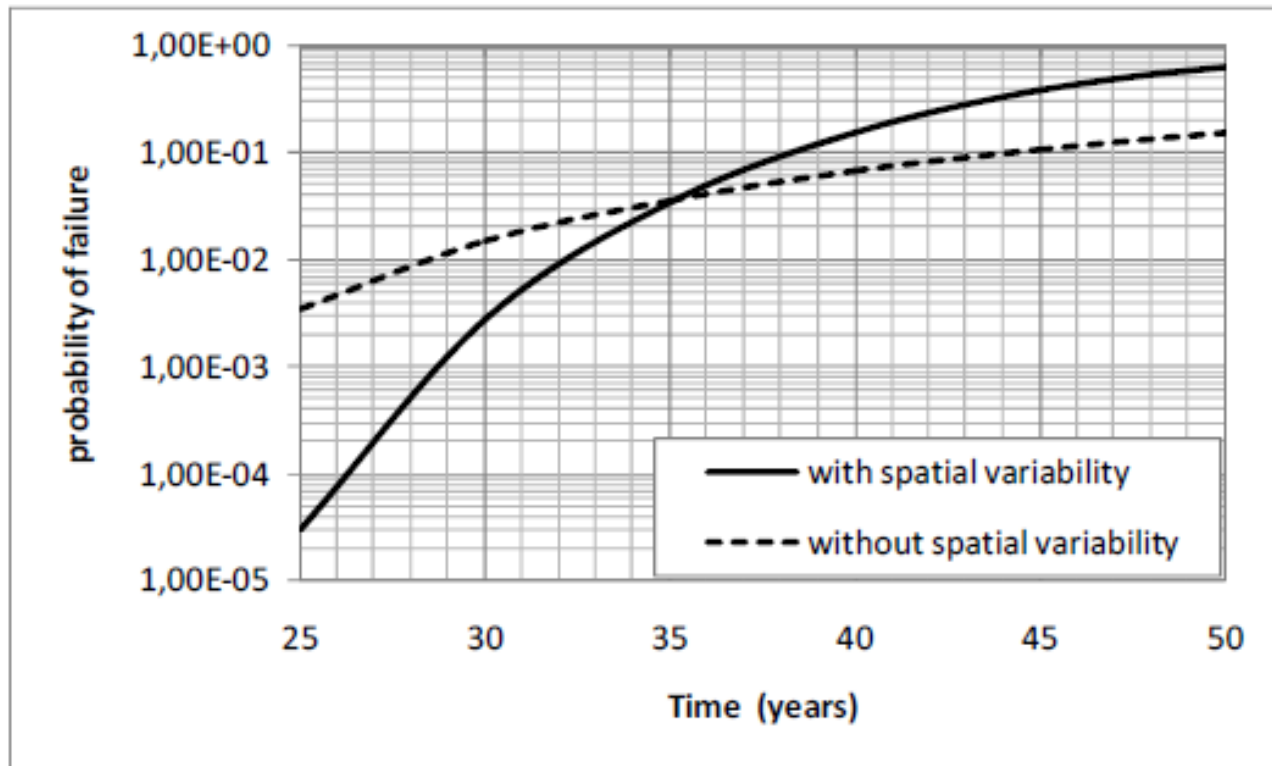
Classe générique (All) :  $k = 0,164$  et  $n = 0,780$



# Impact de la longueur de corrélation

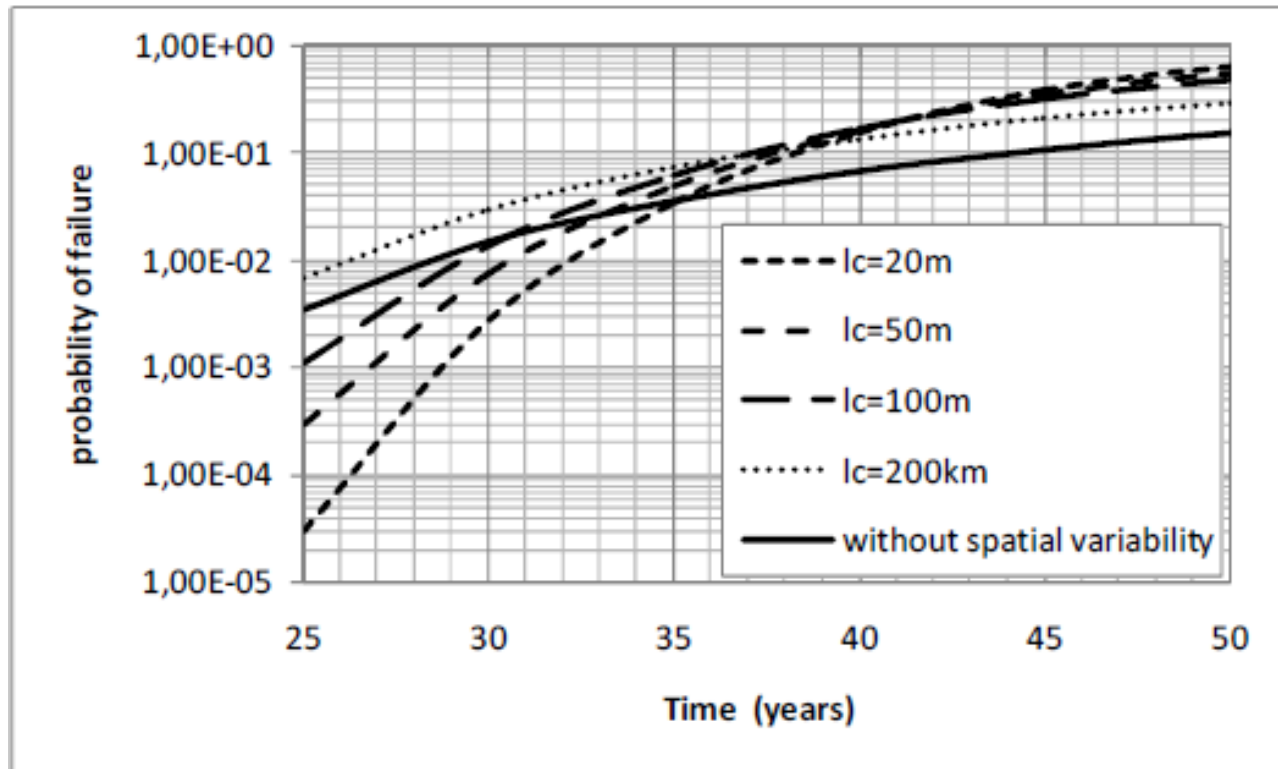
Type du sol : **All** ;  $l_c=20\text{m}$

Longueur du tuyau : **200 km**



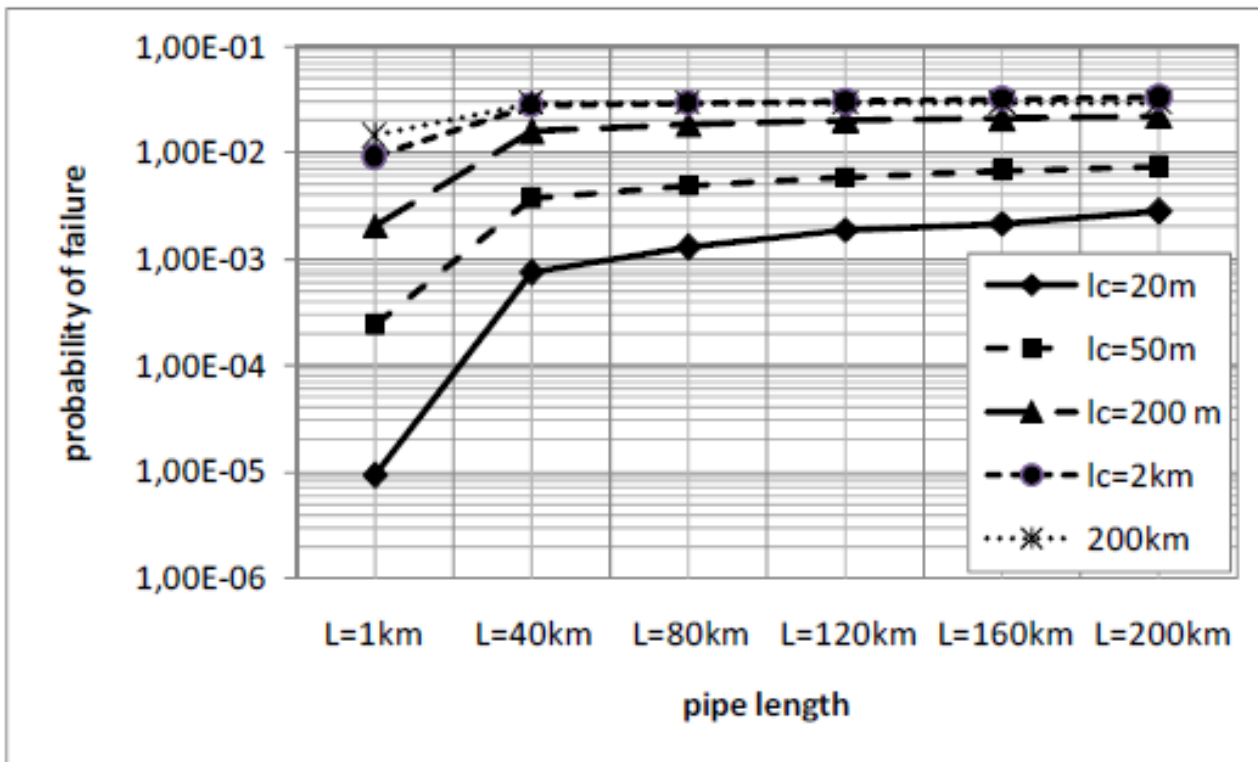
Type du sol : **All**

Longueur du tuyau : **200 km**

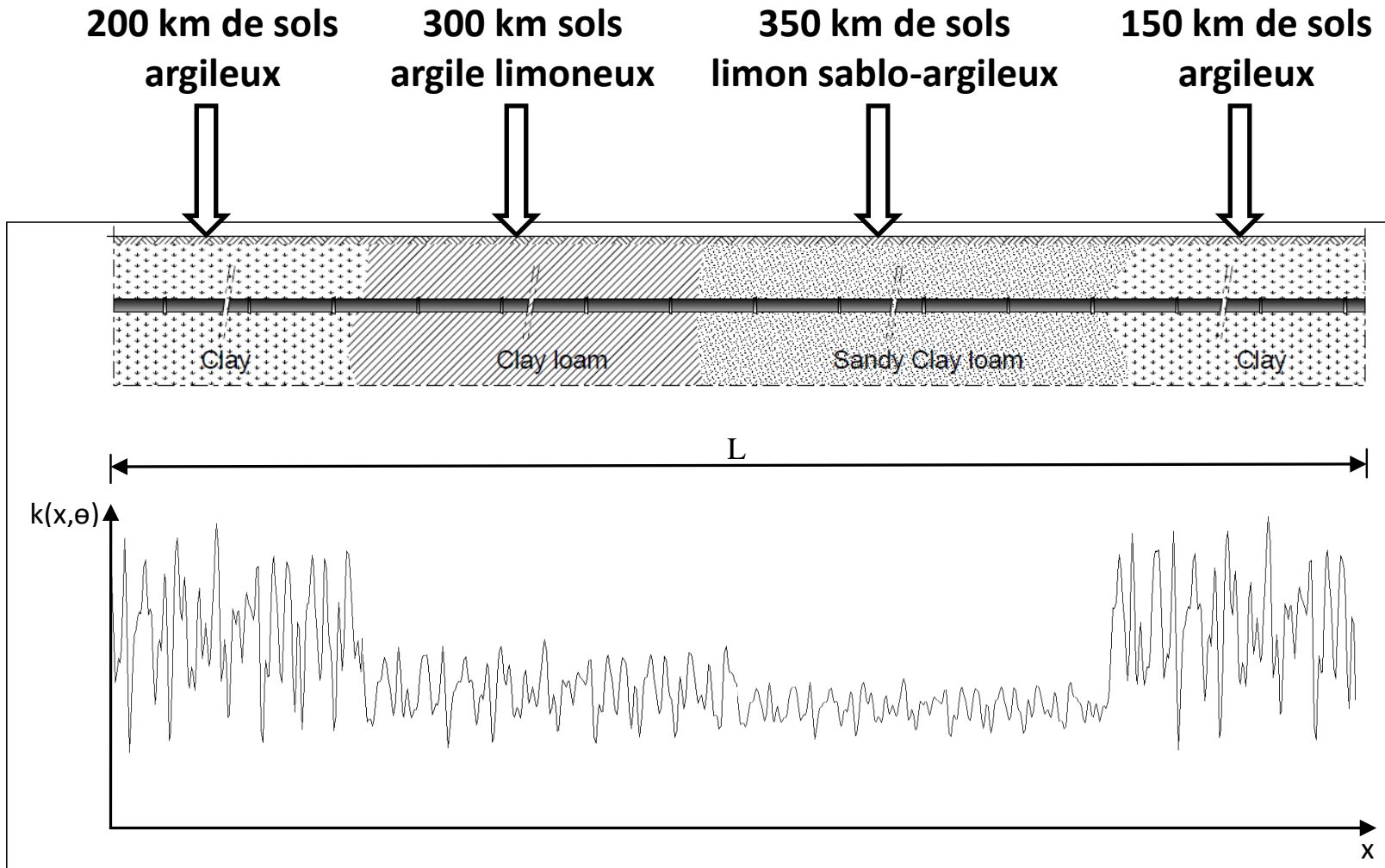


# Impact de la longueur de la structure

Type du sol : **All**



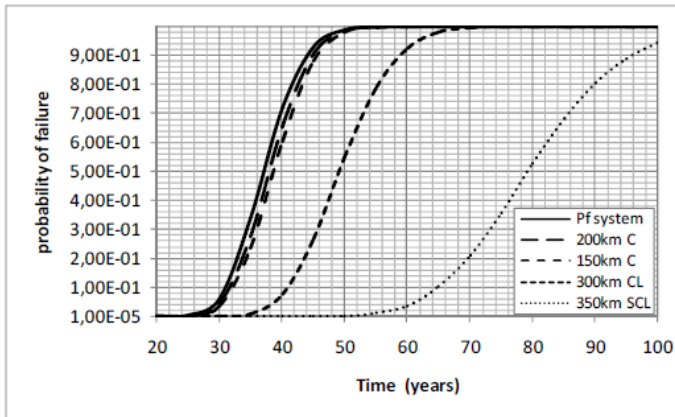
# Pipeline traversant plusieurs types de sol



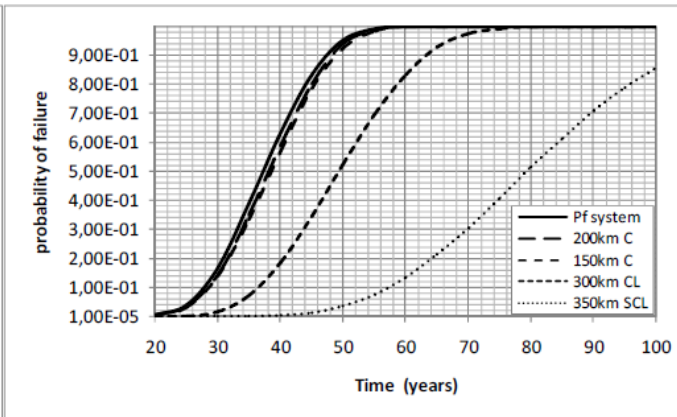
# Probabilité de défaillance pour différents tronçons et pour tout le système

- L'ordre de la corrosivité : argile > argile limoneux > limon sablo-argileux
- $l_c \nearrow \rightleftarrows$  La différence entre les probabilités de défaillance de différentes zones diminue

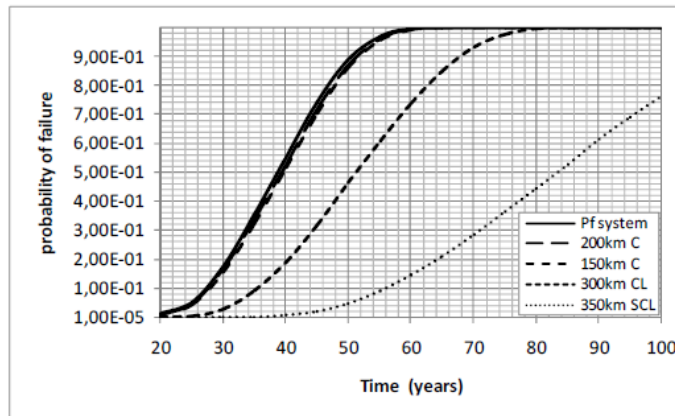
(a)  $l_c = 50m$



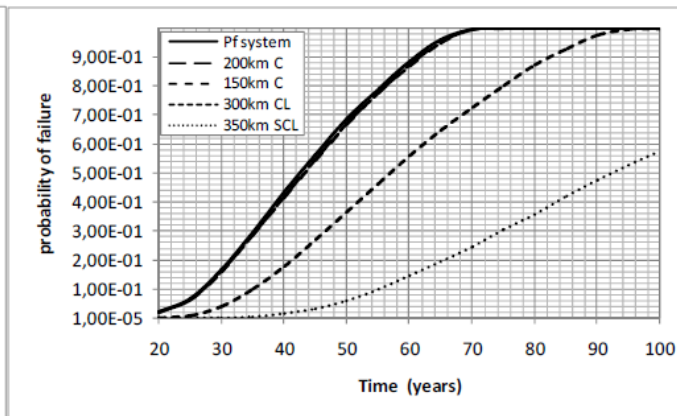
(b)  $l_c = 500m$



(c)  $l_c = 1km$



(d)  $l_c = 10km$

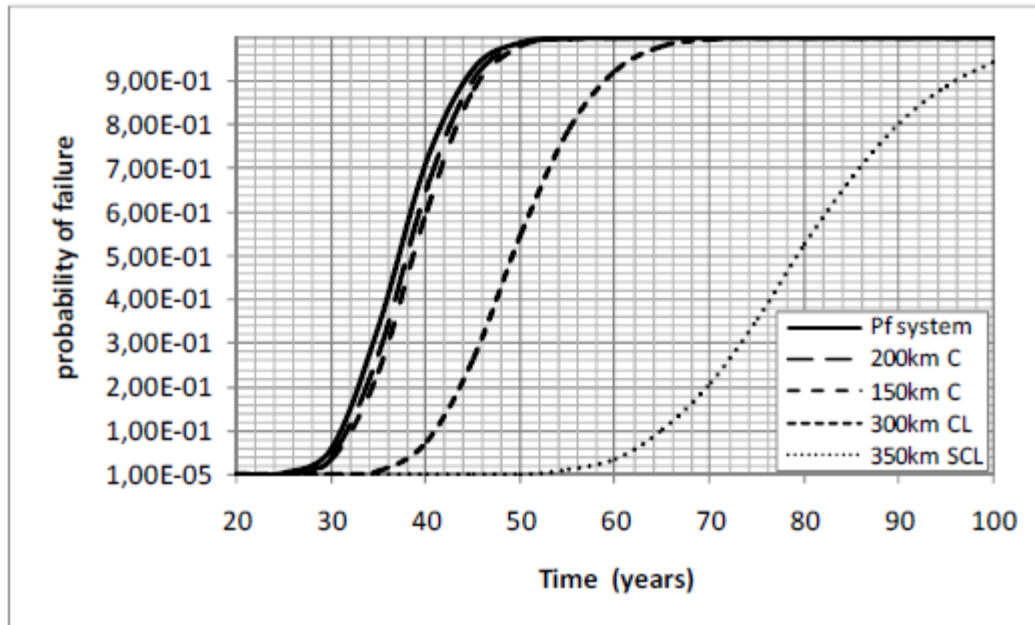




# Cas de faible dépendance spatiale

Temps de Service	Probabilité de défaillance				Pf Système
	200 km de sols argileux	300 km sols argile limoneux	350 km de sols limon sablo argileux	150 km de sols argileux	
40 Ans	0,65	0,076	$10^{-5}$	0,60	0,72

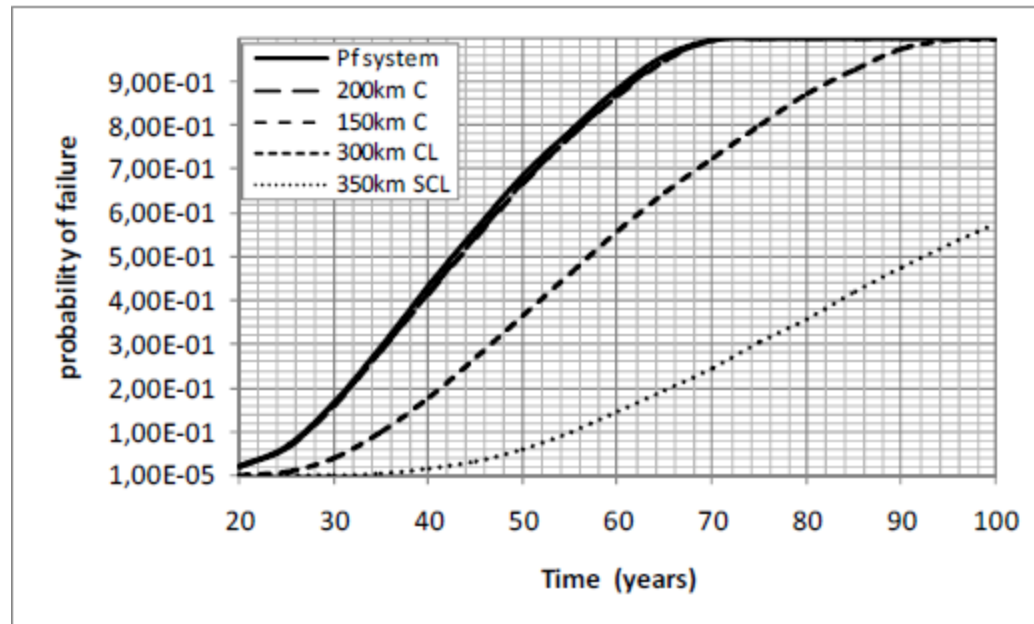
(a)  $lc=50m$



## Cas de forte dépendance spatiale

- La probabilité de défaillance globale du système est approximative à la probabilité de défaillance individuelle maximale

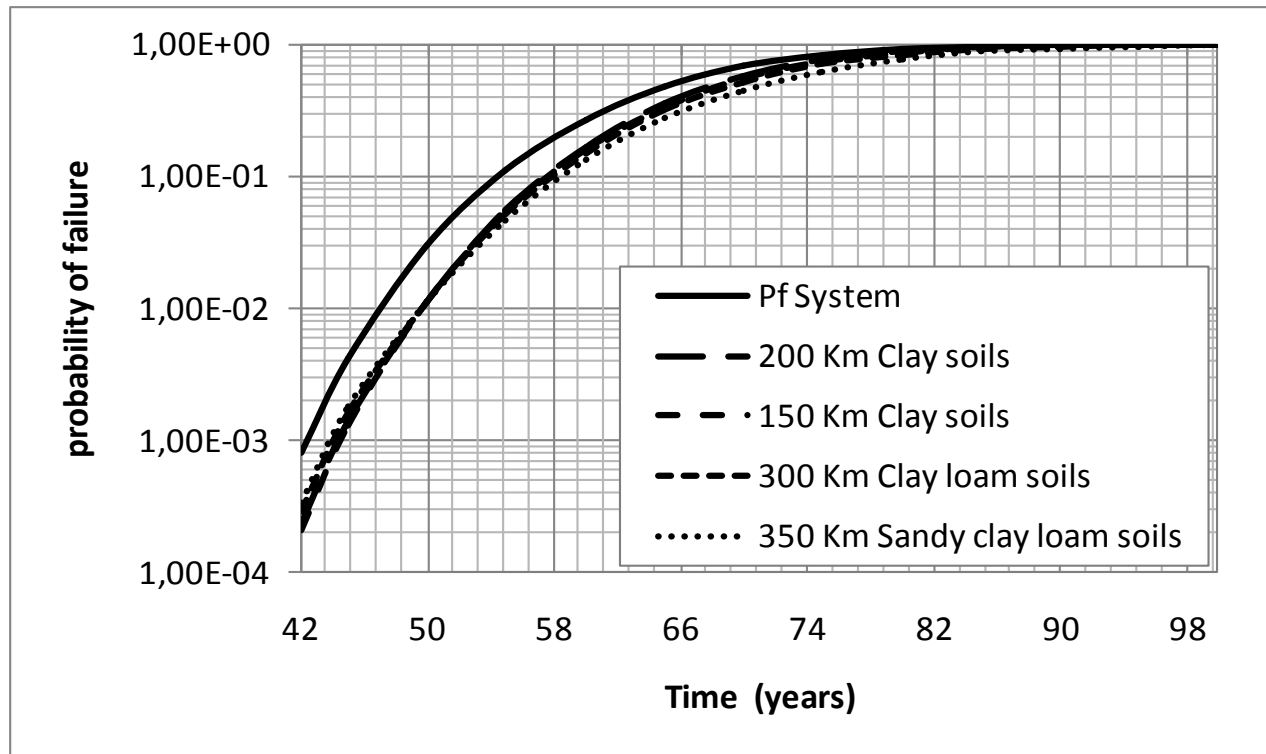
(d)  $l_c = 10\text{km}$



# Fiabilité homogène

- Fiabilité égale à  $10^{-2}$  après 50 ans de service dans tous les tronçons

Zones	200 km de sols argileux	300 km sols argile limoneux	350 km de sols limon sablo argileux	150 km de sols argileux
Epaisseurs modifiées	16.15mm	14,1 mm	11,5 mm	16,1mm



# Conclusion

- ❖ **Impact significatif de l'hétérogénéité du sol sur la fiabilité**
- ❖ **Faible sensibilité de la longueur du tuyau lorsque la corrélation est forte**
- ❖ **En cas de forte dépendance spatiale, la probabilité de défaillance du système converge vers la probabilité de défaillance maximale des composants**
- ❖ **Effet de la longueur de corrélation:**
  - **fiabilité élevée :  $P_f$  augmente avec LC**
  - **fiabilité faible :  $P_f$  diminue avec LC**
- ❖ **Négliger la variabilité spatiale conduit à des estimations trop pénalisantes de la durée de vie et peut conduire à condamner prématurément la structure.**

