



Application du processus gamma pour la gestion de l'entretien routier : cas de la fissuration longitudinale

M. ZOUCH, Chargée de Recherche – TNO (Danemark)

T.G. YEUNG, Maître assistant, EMNantes

B. CASTANIER, Maître assistant, EMNantes

Tristan LORINO, Chargé de recherche, IFSTTAR

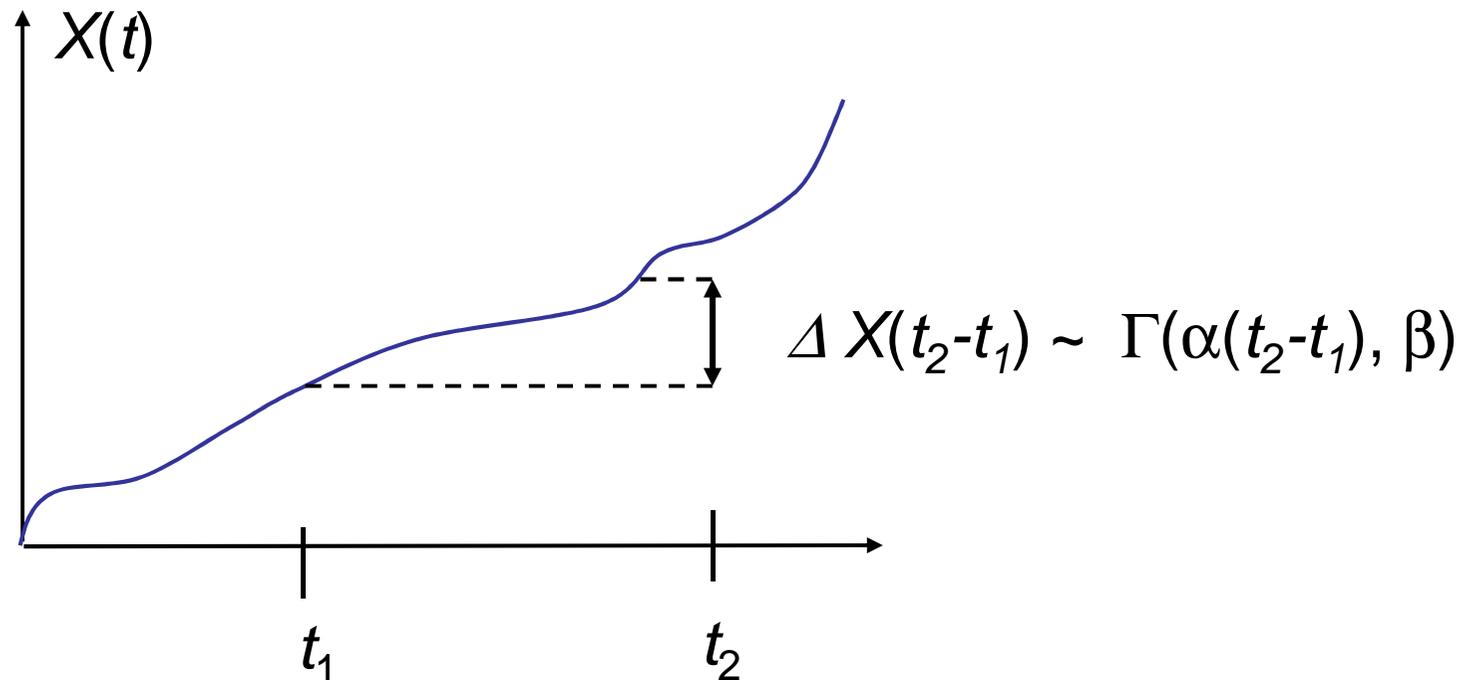
-
- **Contexte de l'étude : le projet SBaDFoRM**
 - Proposition de nouvelles stratégies pour l'entretien routier
 - Application des processus Gamma
 - Analyse des modélisations classiques :
 - De dégradation
 - D'inspection et de maintenance
 - Positionnement du problème
 - **Modélisation des données de fissuration**
 - **Construction du modèle de décision**
 - **Optimisation et règles de décision**
 - **Conclusions et perspectives**

-
- **Contexte de l'étude : le projet SBaDFoRM**
 - **Modélisation des données de fissuration**
 - Premier modèle : un processus bivarié
 - Introduction d'une nouvelle variable
 - Principe de modélisation
 - Limite du modèle
 - Deuxième modèle : processus gamma actualisé
 - Principe de modélisation
 - Analyse
 - **Construction du modèle de décision**
 - **Optimisation et règles de décision**
 - **Conclusions et perspectives**

-
- **Contexte de l'étude : le projet SBaDFoRM**
 - **Modélisation des données de fissuration**
 - **Construction du modèle de décision**
 - Formulation de type Programmation Dynamique Stochastique
 - **Optimisation et règles de décision**
 - Discrétisation et Processus de Décision Markovien
 - Exemple numérique
 - Propriétés structurelles
 - **Conclusions et perspectives**

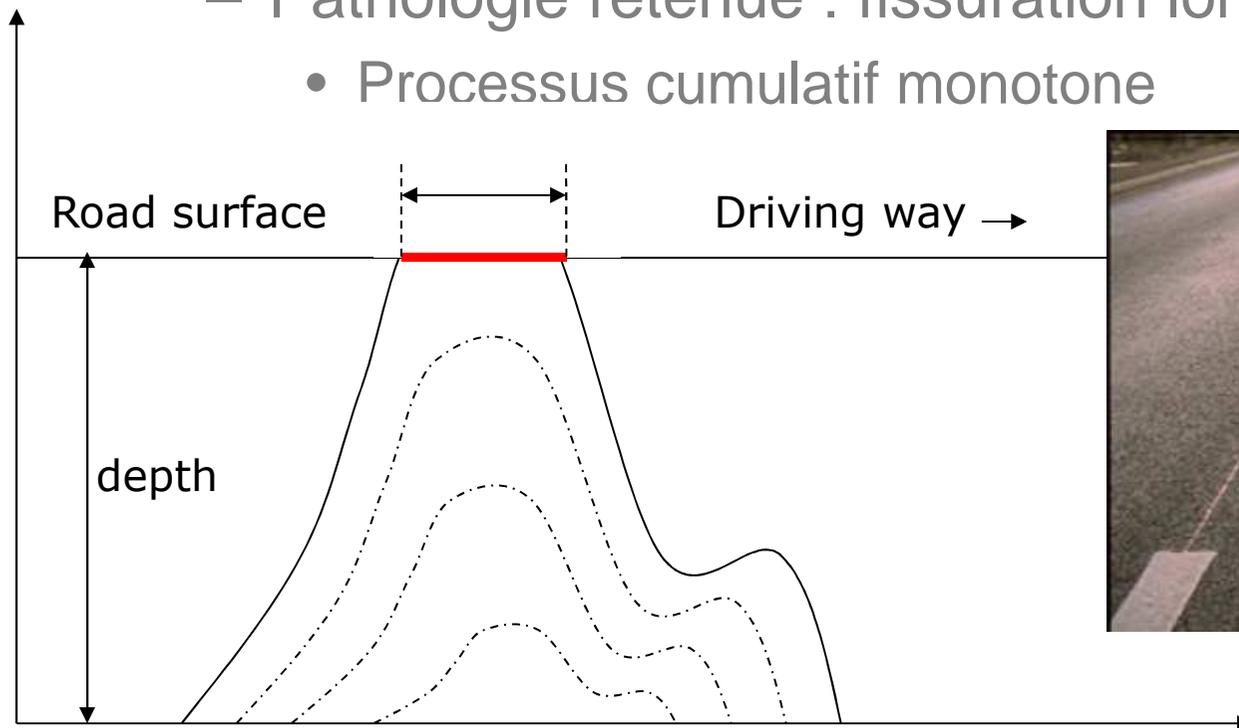
- **Objectif :**

- Étudier l'applicabilité du processus Gamma dans le contexte de l'entretien routier : client IFSTTAR
 - Processus Gamma homogène :



- **Objectif :**

- Étudier l'applicabilité du processus Gamma dans le contexte de l'entretien routier : client IFSTTAR
 - Processus Gamma homogène
- Pathologie retenue : fissuration longitudinale
 - Processus cumulatif monotone

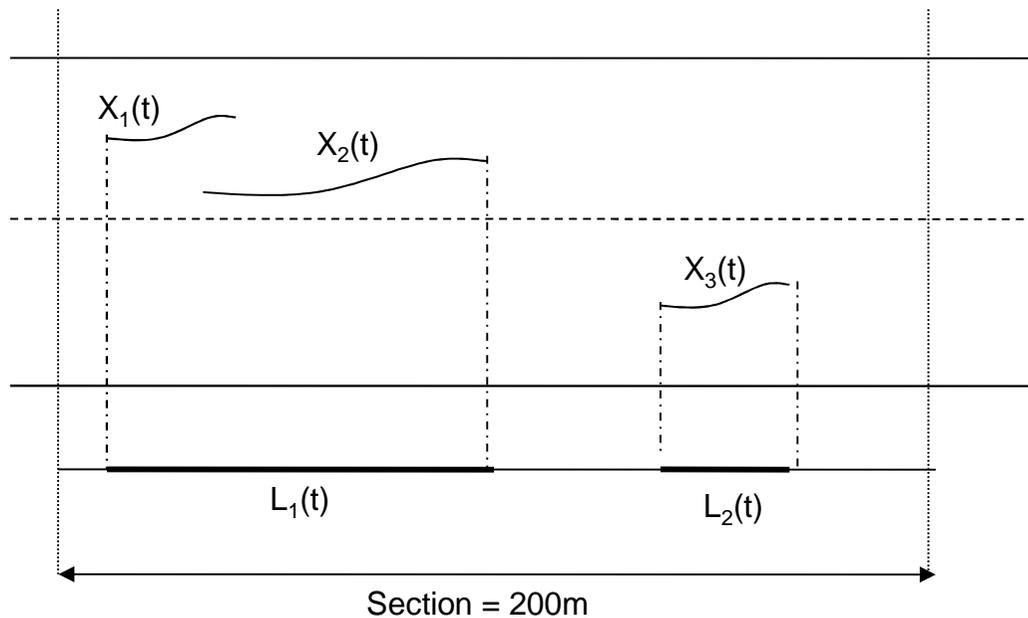


- **Objectif :**
 - Étudier l'applicabilité du processus Gamma dans le contexte de l'entretien routier : client IFSTTAR
 - Processus Gamma homogène
 - Pathologie retenue : fissuration longitudinale
 - Processus cumulatif monotone
 - Indicateur structurel
 - Phénomène récurrent
 - Coût d'entretien correctif important

- **Motivation pour une approche *processus***
 - Modélisation de dégradation type *systèmes électroniques*
 - Caractéristique : taux de défaillance
 - Modélisation binaire de la dégradation
 - N'intègre pas de la *connaissance* dans les modèles (approche purement fréquentielle)
 - Modélisation globale des incertitudes
 - Modélisation par approches *mécano-fiabilistes*
 - Explicitation de la relation résistance-contraintes
 - Difficultés de calibration des modèles (surtout en présence de nombreuses incertitudes) – Robustesse des modèles ?
 - Consommatrice en temps de calcul
 - Quid de la formalisation mathématique dans un contexte d'optimisation maintenance

- **Positionnement du problème**

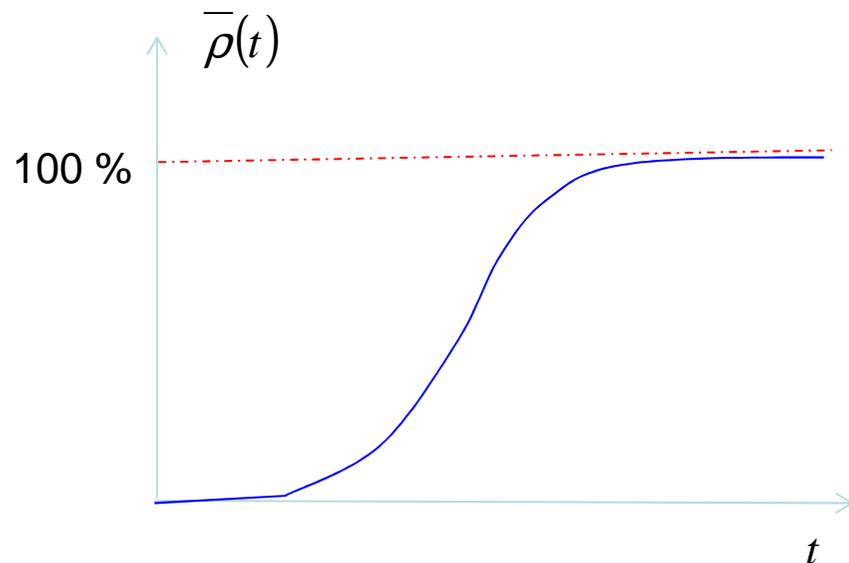
- Les données disponibles : IQRN
 - Pourcentage de fissuration observé tous les 3 ans par section (200 m)



$$\rho(t) = \frac{L_1(t) + L_2(t)}{200}$$

- **Positionnement du problème (dégradation)**

- Les données de fissuration disponibles : IQRN
 - Pourcentage de fissuration observé tous les 3 ans par section (200 m)



- Analyse : 2 phases

- **Initiation**

- ↳ Initiation : aucune observation
- ↳ Besoin d'un indicateur

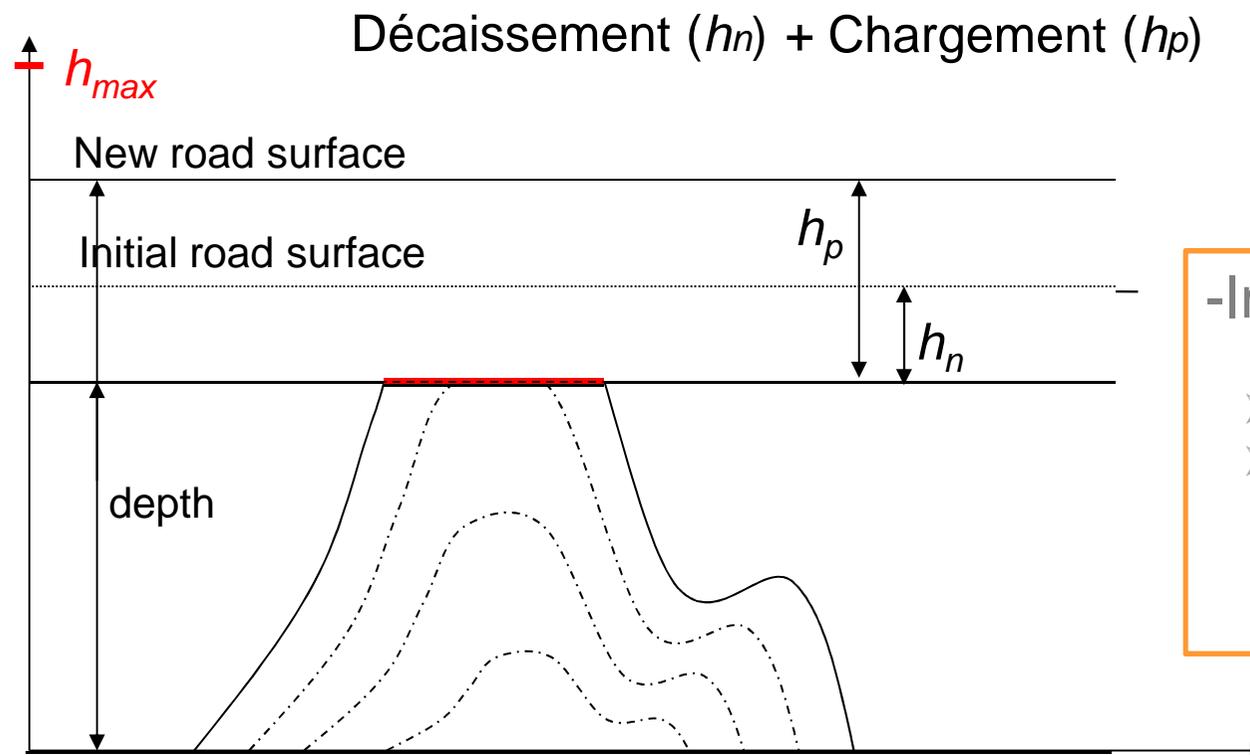
- **Propagation : Comportement non stationnaire**

- ↳ Non *linéarité* de l'indicateur
- ↳ Valeur informative faible de l'indicateur

Modèle de dégradation : Nécessité d'enrichir le niveau courant d'information

- **Positionnement du problème (maintenance)**

- Inspection : supposées parfaites et schéma périodique
- Maintenance :



-Impacts :

- Plus de fissure en surface
- Comportement futur dépendant de
 - la constitution de la nouvelle chaussée
 - l'état avant maintenance

-
- **Analyse des modélisation classiques (maintenance)**
 - Inspection : supposées parfaites et schéma périodique
 - Maintenance imparfaite :
 - Méthode de réduction de l'âge
 - Maintenance basée sur l'âge : réduction du taux de défaillance
 - Maintenance conditionnelle : réduction du niveau de dégradation
 - Méthode d'accélération de dégradation
 - Maintenance basée sur l'âge : modèles Maintenance Préventive linéaire et non linéaire
 - Maintenance conditionnelle : *Pas de modèle général*

-
- **Analyse des modélisations classiques (maintenance)**
 - Inspection : supposées parfaites et schéma périodique
 - Maintenance imparfaite
 - Maintenance multi-action
 - Structure décisionnelle a priori
 - Possible pour un nombre très limité d'actions
 - Approches de Programmation Dynamique Stochastique
 - Pas toujours adaptées au contexte décisionnel industriel

Pas de prise en compte des effets d'entretien

-
- **En conclusion, besoins en termes de :**
 - Indicateur de fissuration
 - Amélioration de la valeur informative sur les 2 phases
 - Modèle de dégradation
 - Cumulatif à 2 phases
 - Prise en compte d'un fort niveau d'incertitudes
 - Non stationnaire
 - Effets de maintenance
 - Remise à zéro de l'indicateur
 - Impact sur le comportement de la fissuration
 - Diversité des entretiens

-
- **Contexte de l'étude : le projet SBaDFoRM**
 - **Modélisation des données de fissuration**
 - Premier modèle : un processus bivarié
 - Introduction d'une nouvelle variable
 - Principe de modélisation
 - Limite du modèle
 - Deuxième modèle : processus gamma actualisé
 - Principe de modélisation
 - Analyse
 - **Construction du modèle de décision**
 - **Optimisation et règles de décision**
 - **Conclusions et perspectives**

Modélisation de la dégradation

- **Premier modèle : un processus bivarié**

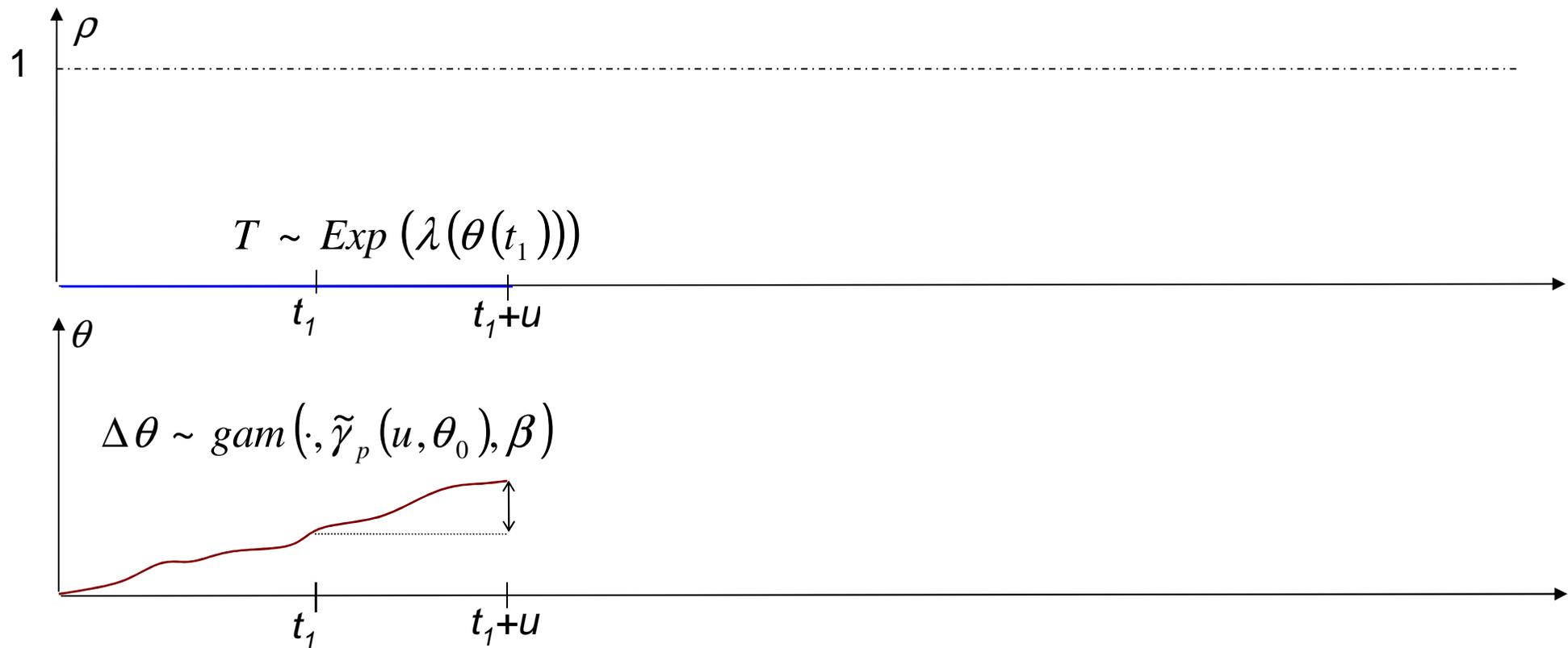
- Extension de la définition d'état : $s_t = (\rho_t, \theta_t)$

- ρ_t : pourcentage de fissuration
- θ_t : potentiel de fissuration (rend compte de l'état sous-jacent de la chaussée)

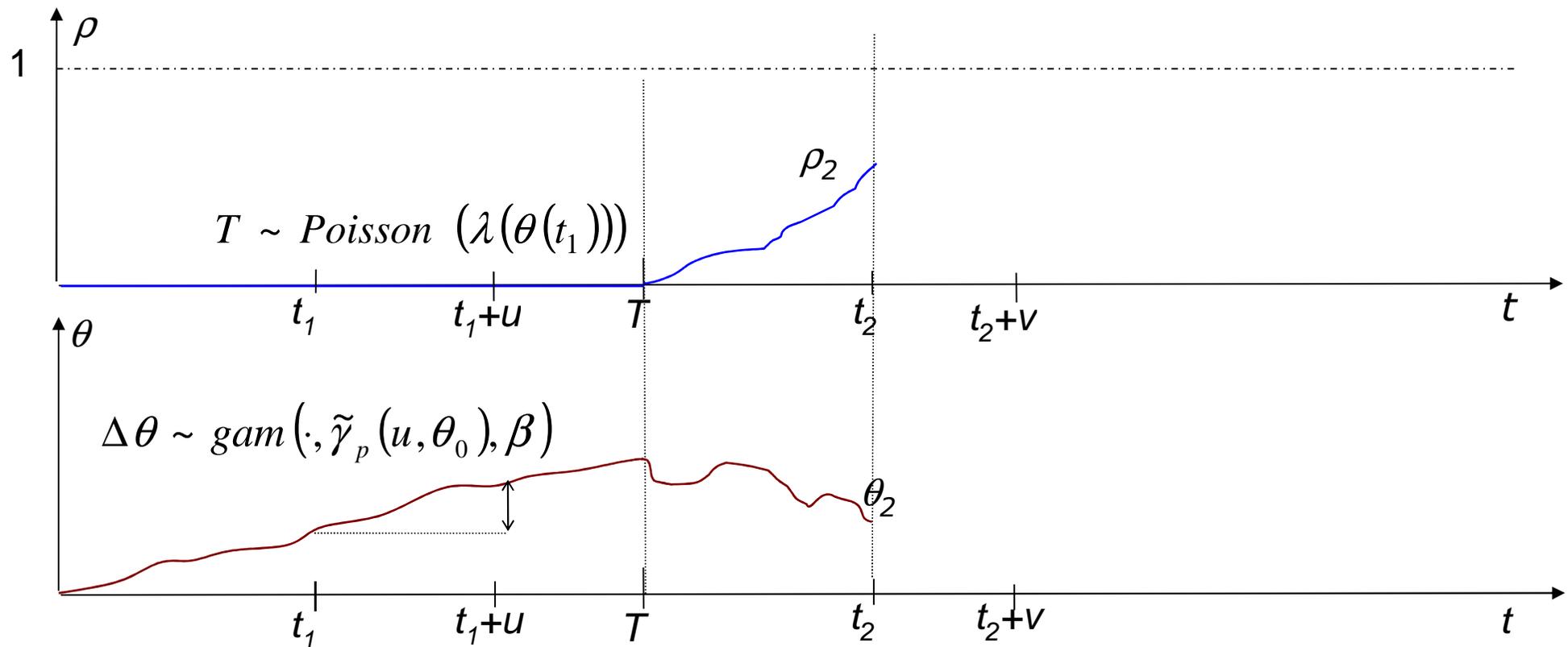
- Construction du modèle prédictif

- $h_{(t,t+\delta)}(\bullet|s_t)$: Loi jointe conditionnelle du processus à partir des lois marginales conditionnelles :
- $g_{(t,t+\delta)}(\bullet|s_t)$: Loi marginale conditionnelle de $\{\rho_t, t > 0\}$
- $f_{(t,t+\delta)}(\bullet|\rho_t, \rho_{t+\delta})$: Loi conditionnelle du $\{\theta_t, t > 0\}$

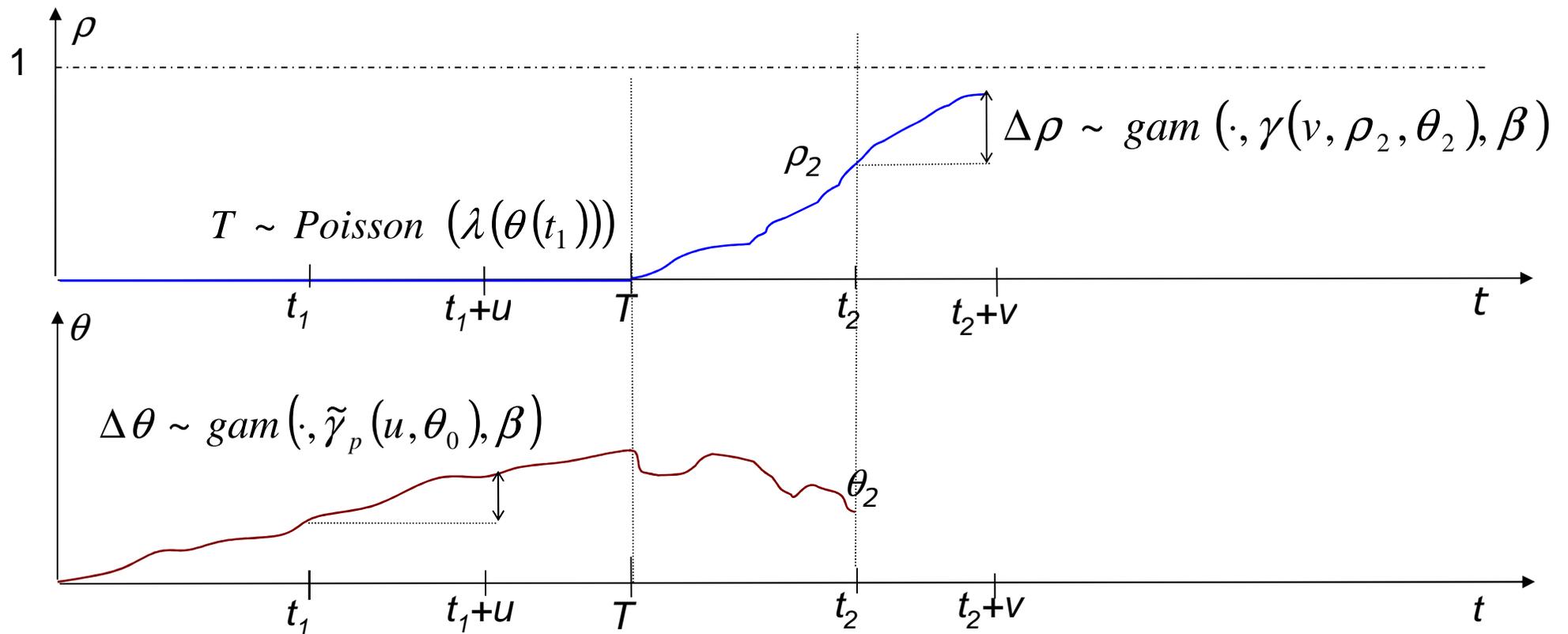
Modélisation de la dégradation



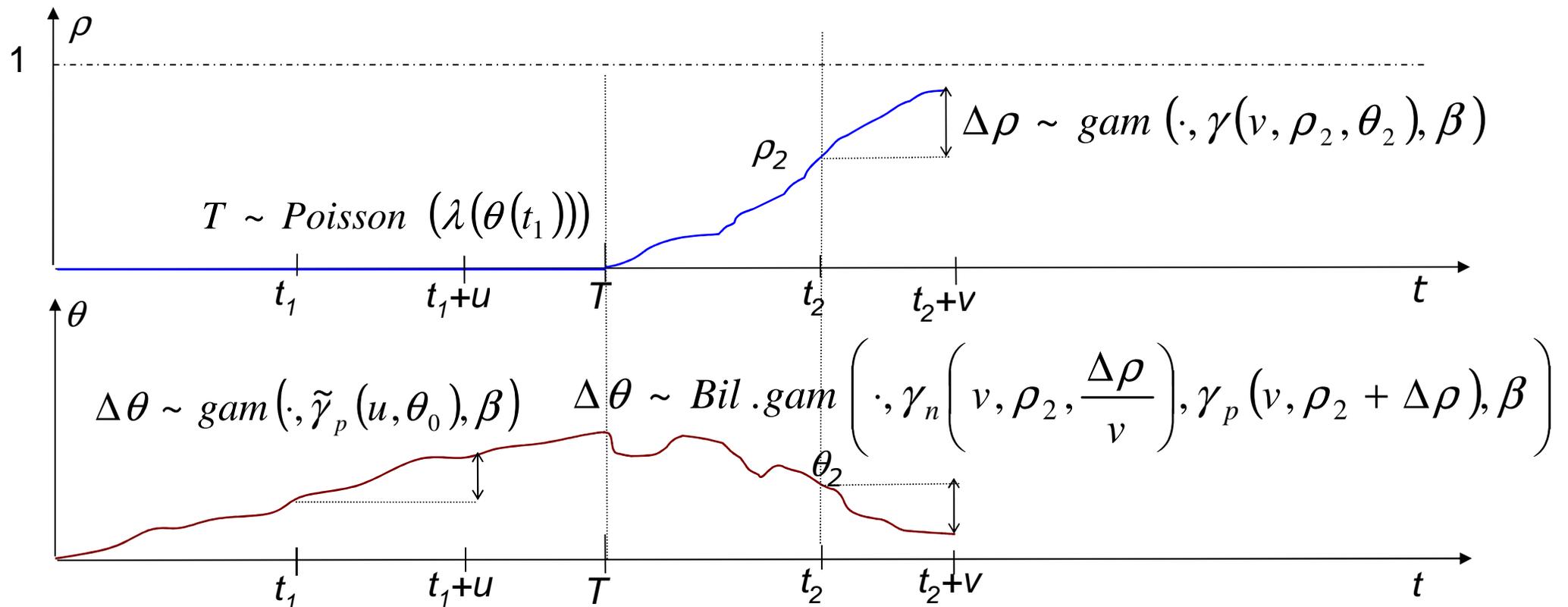
Modélisation de la dégradation



Modélisation de la dégradation

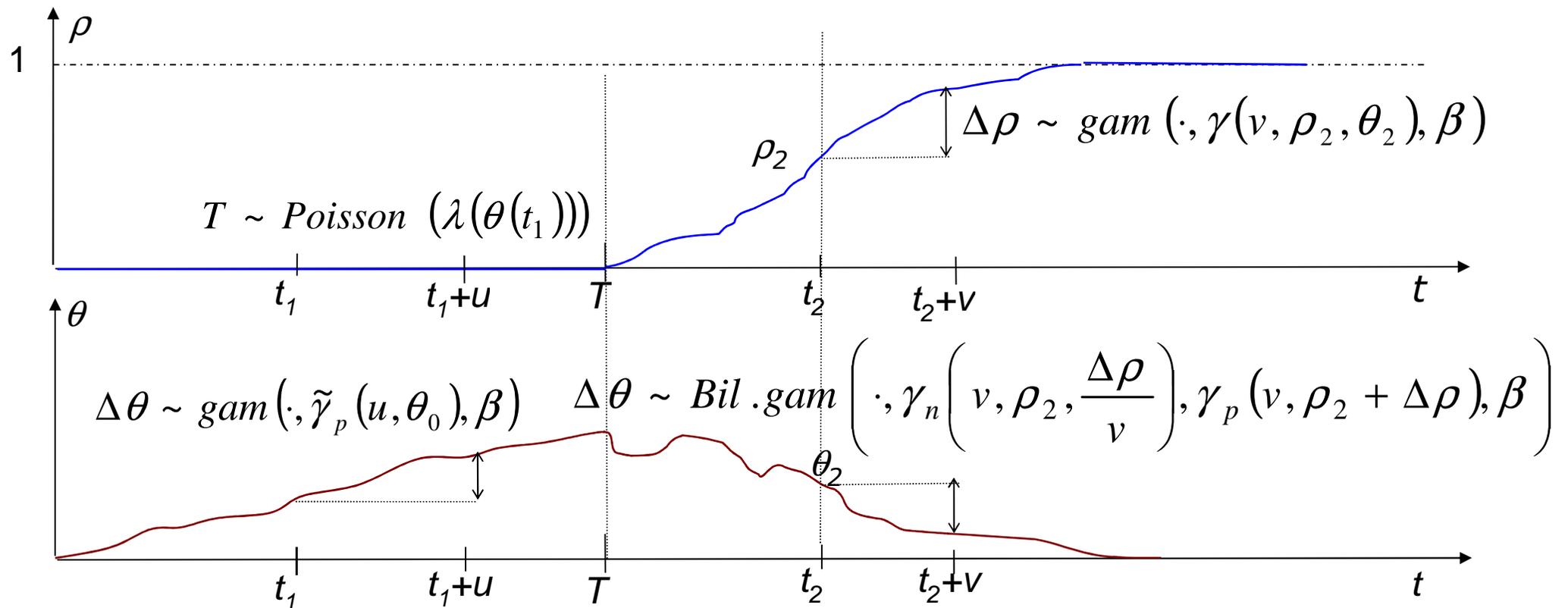


Modélisation de la dégradation



$$h_v(x, y|\rho, \theta) = g_v(x|\rho, \theta) \cdot f_v(y|x, \rho), \forall (x, y) \in [0, 1 - \rho] \times (-\theta, \theta_{\max} - \theta)$$

Modélisation de la dégradation



Modélisation de la dégradation

- **Premier modèle : discussion**

- Définition d'un processus gamma non stationnaire en l'état
- Application du processus bilatéral gamma au contexte maintenance
- Unique modèle pour les 2 phases
- Flexibilité du modèle

- Non observabilité de θ :
 - Calibration empirique du modèle
 - Problème d'identification du paramètre

Modélisation de la dégradation

- **Deuxième modèle : Processus gamma actualisé**

- Idée générale :

2 observations successives : information sur l'état de la sous-couche et des contraintes

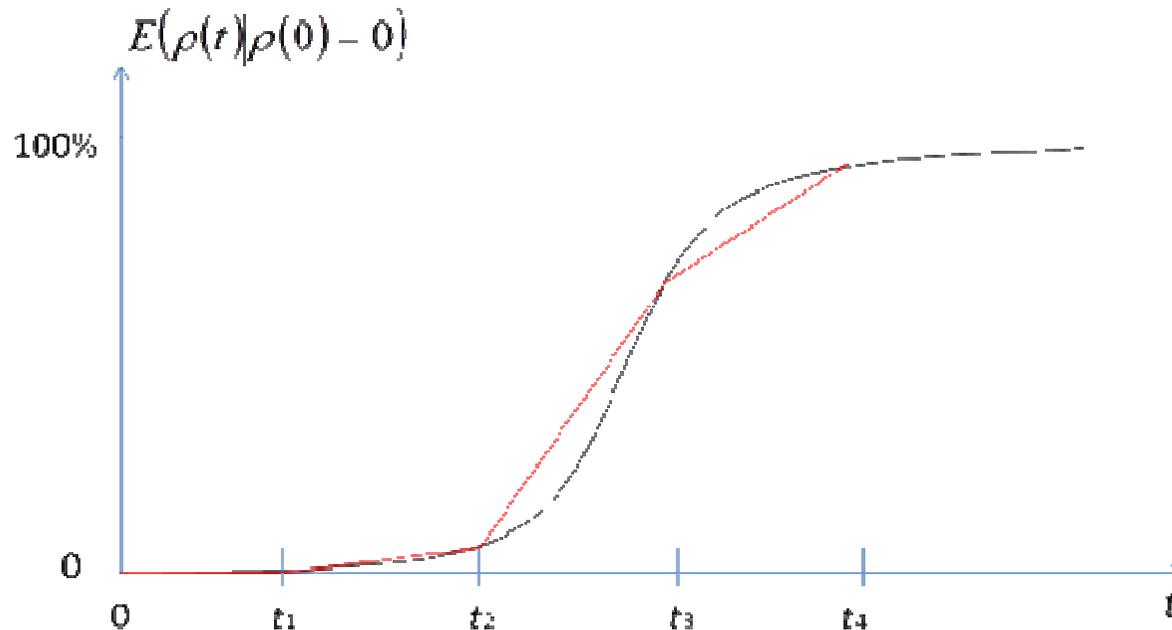
- Introduction d'un facteur de correction individuel (facteur d'accélération) : θ
 - Actualisation de la valeur de θ par le biais d'observations successives

Modélisation de la dégradation

- **Deuxième modèle : Processus gamma actualisé**

$$\Delta\rho_{(\rho_1, \theta_1)}(\tau) \sim \text{gamma}(\alpha(\rho_1, \theta_1) \cdot \tau, \beta)$$

- avec $\alpha(\rho_1, \theta_1) = \theta_1(1 - \rho_1) \exp\left(-\frac{(\rho_1 - a_m)^2}{b_m}\right)$



Linéarisation par morceaux du PFL

Modélisation de la dégradation

- **Deuxième modèle : Processus gamma actualisé**

$$\Delta\rho_{(\rho_1, \theta_1)}(\tau) \sim \text{gamma}(\alpha(\rho_1, \theta_1) \cdot \tau, \beta)$$

$$\text{avec } \alpha(\rho_1, \theta_1) = \theta_1(1 - \rho_1) \exp\left(-\frac{(\rho_1 - a_m)^2}{b_m}\right)$$

– θ_1 : facteur de correction individuel

- $\{\theta_t | \rho_t, t > 0\}$ **n'est plus un processus** (pas de prise en compte de son évolution temporelle)

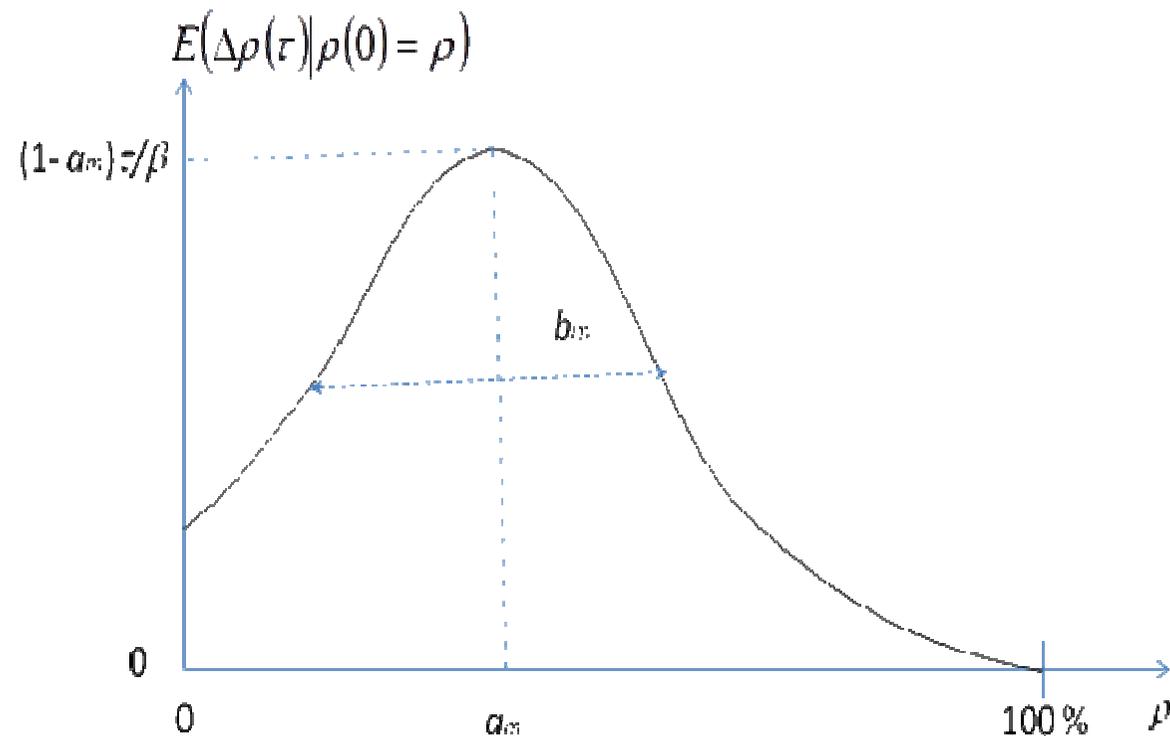
- Procédure d'actualisation :

$$\theta \sim N(\hat{\mu}(\rho_1, \rho_2), \hat{V}(\rho_1, \rho_2))$$

$$\text{avec } \begin{cases} \hat{\mu}(\tau | \rho_1, \rho_2) = \beta \frac{\rho_2 - \rho_1}{\tau} \exp\left(\frac{(\rho_1 - a_m)^2}{b_m}\right) \\ \hat{V}(\rho_1, \rho_2) = \beta^2 \frac{\rho_2 - \rho_1}{\tau} \exp\left(\frac{(\rho_1 - a_m)^2}{b_m}\right) \end{cases}$$

Modélisation de la dégradation

- **Deuxième modèle : identification et estimation**
 - Identification des paramètres :



Modélisation de la dégradation

- **Deuxième modèle : identification et estimation**

- Identification des paramètres :

- Procédure d'estimation

- Hypothèse : $\beta =$ constante pour toutes les sections

- Classification des sections (fonction des charges, épaisseurs, matériau, etc.) : m

- Estimation pour $\theta = 1$ (comportement moyen)

- *Step 1 : Construction de l'échantillon global*

$$\{(\rho_i^j, \Delta\rho_i^j, m), i \in N, j \in N, m \in N\}$$

- *Step 2 : Estimation de β par MV sur échantillon global*

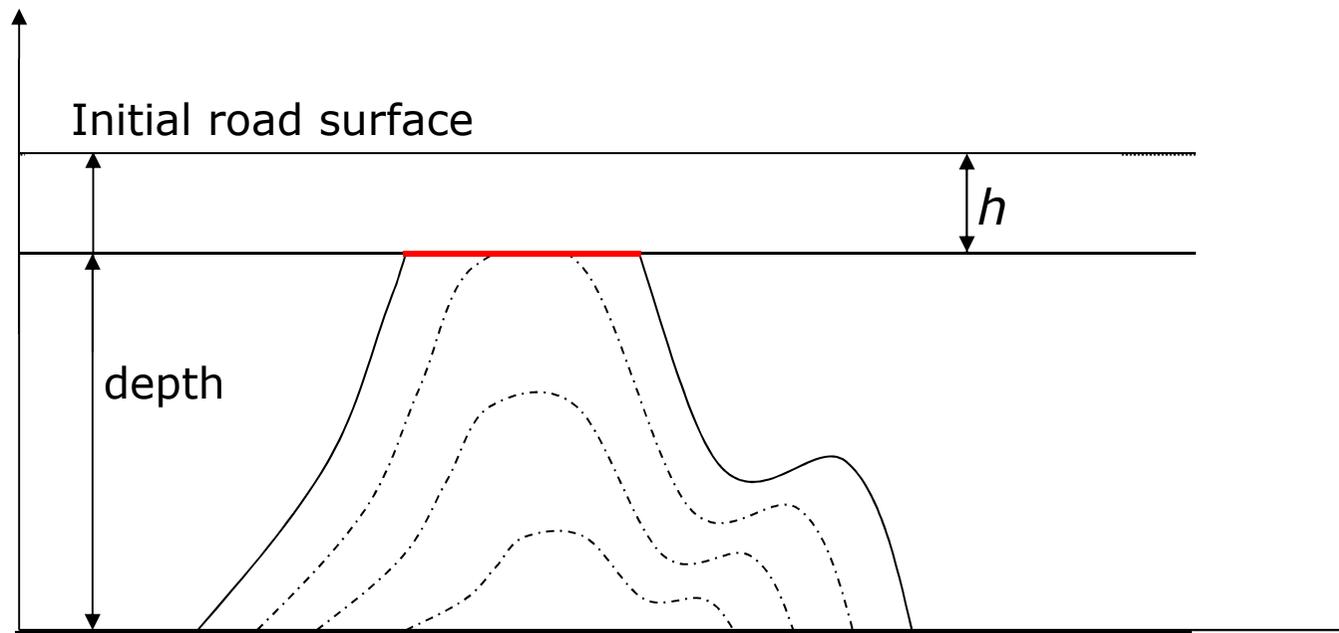
- *Step 3 : Estimation des (a_m, b_m) par MV pour chaque m*

-
- Contexte de l'étude : le projet SBaDFoRM
 - Modélisation des données de fissuration
 - **Construction du modèle de décision**
 - Formulation de type Programmation Dynamique Stochastique
 - Optimisation et règles de décision
 - Conclusions et perspectives

Construction du modèle de décision

- **Problème simplifié**

- Chaussée à hauteur fixe : Rechargement = Décaissement
- 4 niveaux d'entretien : $MX1$, $MX2$, $MX3$, $MX4$



Construction du modèle de décision

- **Coût escompté sur un horizon infini (formulation dynamique stochastique)**

$$V_{\tau}^{\pi^*}(\rho, \theta, m) = c_i + \min_{k \in \{0,1,2,3,4\}} \{MX_k(\rho, \theta, m)\}$$

Avec $\lambda \in (0,1)$,

$$MX_0(\rho, \theta, m) = \int \int_{x \ y} h_{\tau}(x, y | \rho, \theta, m) \cdot [C_q(\rho, \rho + x, \tau) + \lambda V_{\tau}^{\pi^*}(\rho + x, \theta + y, m)] dy dx$$

$$\text{Pour } k \in \{1,2,3,4\}, MX_k(\rho, \theta, m) = c_k + MX_0(0, \theta_k(\rho, \theta), k)$$

-
- Contexte de l'étude : le projet SBaDFoRM
 - Modélisation des données de fissuration
 - Construction du modèle de décision
 - **Optimisation et règles de décision**
 - Discrétisation et Processus de Décision Markovien
 - Exemple numérique
 - Propriétés structurelles
 - Conclusions et perspectives

Optimisation et règles de décision

- **Résolution du critère :**
 - Discrétisation de l'espace d'états : Processus de Décision Markovien
 - Algorithmes classiques : Policy iteration algorithm

Optimisation et règles de décision

- **Exemple :**

- Données et fonctions génériques
- Matrices de décision: pour chaque état de la chaussée et du dernier entretien

ρ	.9	2	2	2	3	3	3	4	4	4	4
	.8	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4
	.7	1	2	2	3	3	3	3	3	3	4
	.6	1	2	2	2	3	3	3	3	3	4
	.5	1	1	2	2	3	3	3	3	3	4
	.4	1	1	2	2	3	3	3	3	3	4
	.3	1	1	2	2	3	3	3	3	3	3
	.2	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3
	.1	1	1	1	2	2	3	3	3	3	3
	.03	0	0	1	2	2	3	3	3	3	3
	0	0	0	1	2	2	3	3	3	3	3
			.03	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8
		θ									

ρ	.9	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4
	.8	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4
	.7	0	0	1	2	3	3	3	3	3	4
	.6	0	0	0	1	3	3	3	3	3	4
	.5	0	0	0	0	0	0	0	3	3	4
	.4	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4
	.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
	.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			.03	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8
		θ									

Optimisation et règles de décision

- **Propriétés structurelles**
 - Recherche des intervalles de validité pour les paramètres pour la définition de « zones de décision »

Propriétés structurelles

- **Démarche**

- Étude des conditions pour l'obtention de politiques optimales à seuils
- Relations d'ordre (notamment stochastique) sur les états pour estimer les ratios coût/efficacité des actions de maintenance qui repose sur :
 - La construction d'une fonction score (croissante ou croissante convexe)
 - L'étude de concavité de la fonction objectif en l'état
 - Propriété IFR de la matrice de transition
 - Monotonie de l'efficacité des actions
 - Caractérisation de la fonction Qualité (concave, non décroissante)
 - Étude comparative de l'efficacité immédiate pour chaque état
 - Déduction des seuils (repose sur la proposition de Derman (1963))

- **Résultat**

- Algorithme « accéléré » pour les MDP
- Heuristique pour les POMDP
- Amélioration de l'implantation des règles de décision dans un contexte opératoire

-
- Contexte de l'étude : le projet SBaDFoRM
 - Modélisation des données de fissuration
 - Construction du modèle de décision
 - Optimisation et règles de décision
 - **Conclusions et perspectives**

Conclusions et perspectives

- **Proposition d'un ensemble de contributions :**
 - Sur le champ des processus stochastiques :
 - Extension du processus gamma au gamma conditionnel (levée de la difficulté de la non-stationnarité)
 - Sur le champ de l'optimisation de la maintenance
 - Maintenance imparfaite
 - Relation entre indicateur et *état* de dégradation
 - Impact sur les lois d'évolution dans un contexte conditionnel
 - Maintenance multi-actions
 - Sur le champ du Génie Civil
 - Renforce la pertinence des approches « *Méta-Modèles* »
 - Modélisation plus globale des incertitudes
 - Amélioration du compromis « modélisation » versus « optimisation »

Conclusions et perspectives

- **Niveau SBaDFoRM**

- Tester la méthode « Processus gamma actualisé » sur données réelles
- Intégrer cette approche au niveau d'un réseau routier

- **Autres domaines d'application**

- Étudier l'applicabilité de notre modèle sur d'autres modes de dégradation (corrosion, usure par exemple)
- Prendre en compte l'incertitude dans la mesure
- Considérer plusieurs modes de dégradation
- Meilleure prise en compte des ressources budgétaires et de maintenance (surtout dans des contextes de ressources partagées pour le maintien de plusieurs systèmes)