

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

Optimisation de la maintenance de la géométrie de la voie

Carolina MEIER-HIRMER

SNCF - Direction de l'Infrastructure

FIMA - 30 avril 2009



Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

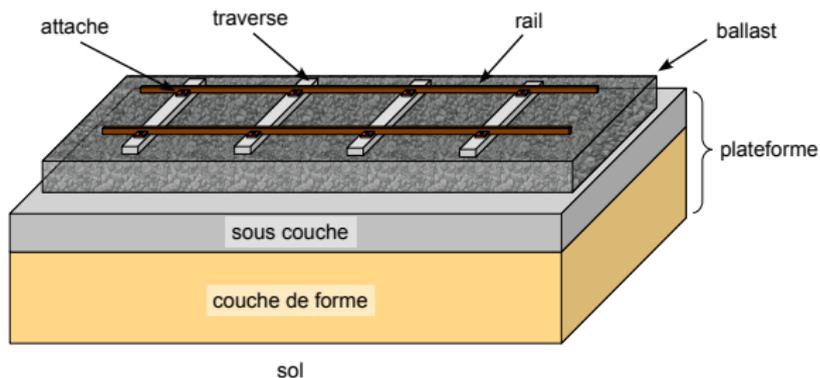
Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié



Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

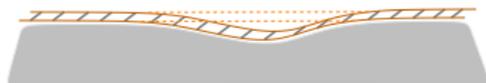
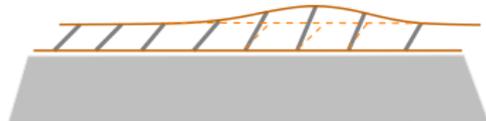
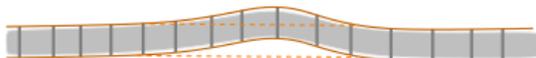
Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

nivellement longitudinal **NL**nivellement transversal **NT**écartement **EC**dressage **D**

Pour cette étude, un tronçon homogène en terme d'âge, de rails, de traverses et de vitesse limite sur la ligne Paris-Lyon a été choisi.

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié



Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié



	Type de défauts	Critères
● MAUZIN classique	ponctuels	sécurité
MAUZIN allongé	30 mètres	sécurité / confort
MAUZIN synthétique	200 / 1000 mètres	qualité

- Seuils qui définissent les niveaux de qualité géométrique :
 - QO qualité objective ;
 - II initiation d'une intervention ;
 - DL dégradation limite.
- Dans l'étude, le DL est fixé à 1.3 et le niveau II est optimisé.

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

- La programmation annuelle est faite en fonction du groupe UIC¹.
- Les inspections sur ligne classique sont effectuées par la voiture MAUZIN.
- Sur ligne à grande vitesse une rame spéciale (IRIS320) a été développée :
 - inspections à la vitesse de la ligne(entre 270 et 320 km/h),
 - toutes des 2 semaines,
 - en journée (pas d'impact sur la maintenance).

¹Indicateur de l'importance d'une ligne, défini par l'Union internationale des chemins de fer

Graphique des mesures MAUZIN synthétiques

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

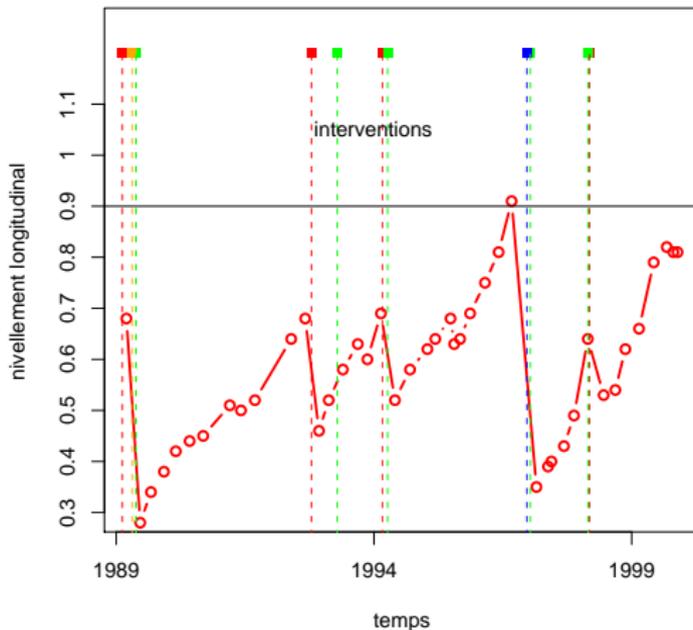
Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

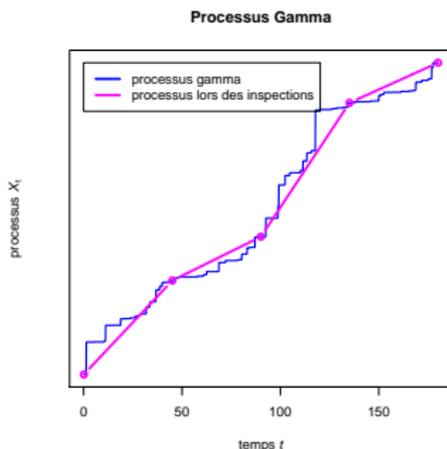
Gamma bivarié

Géométrie de la voie



Un processus gamma modélise la dégradation décrite par les indicateurs synthétiques.

Le processus



- dépend de deux paramètres α et β estimés par maximum de vraisemblance.
- est à accroissements indépendants.
- a une évolution moyenne linéaire (pente = $\frac{\alpha}{\beta}$).
- dispose de formules explicites pour les calculs.

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

Résultats de la dégradation sur la ligne Paris-Lyon :

	avant TGV med	après TGV med
$\frac{\alpha}{\beta}$	0.0009	0.0021
CI	[0.0007, 0.0012]	[0.0020, 0.0022]

- La dégradation moyenne a doublé après l'ouverture du TGV Méditerranée.

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié



Le bourrage est

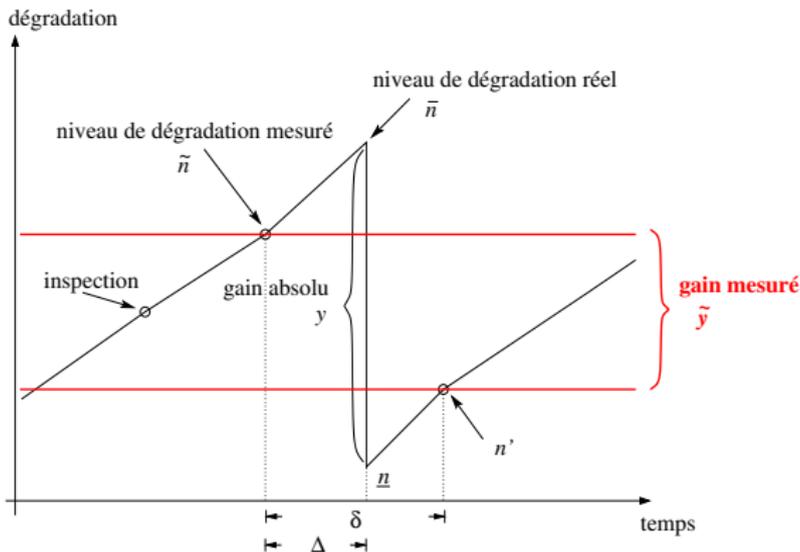
- l'intervention globale la plus fréquente et la moins coûteuse ;
- programmé en fonction des indicateurs MAUZIN synthétiques.

- Le remplacement de ballast est considéré comme une intervention exceptionnelle.



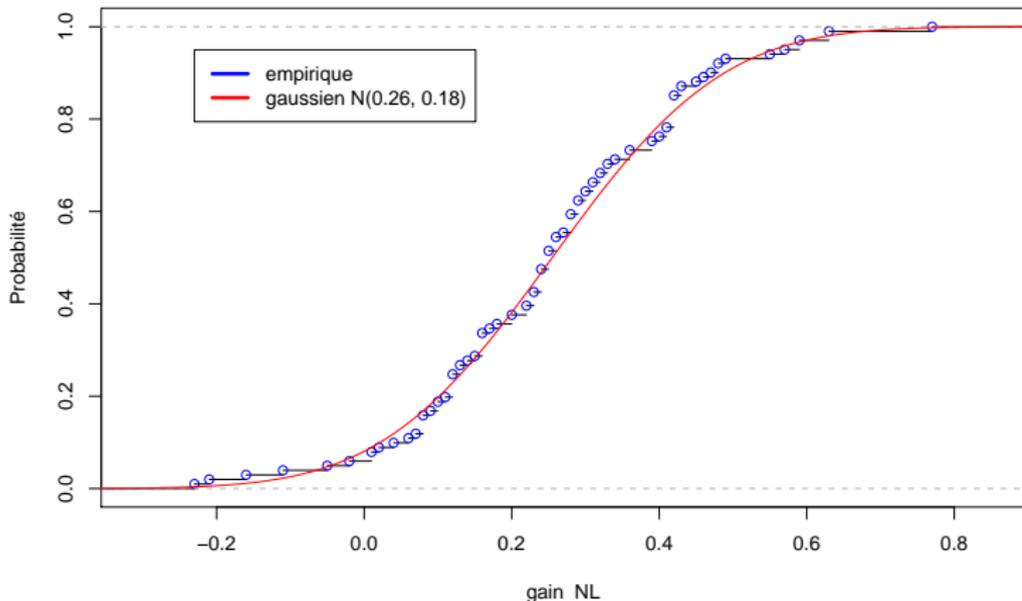
- Différence entre le gain absolu et le gain mesuré :

$$y = \tilde{y} + \frac{\alpha}{\beta} \cdot \delta.$$
- Ajustement du niveau de dégradation lors de l'intervention.



Le gain absolu suit une loi gaussienne :

Estimation de la distribution de gain après bourrage



Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

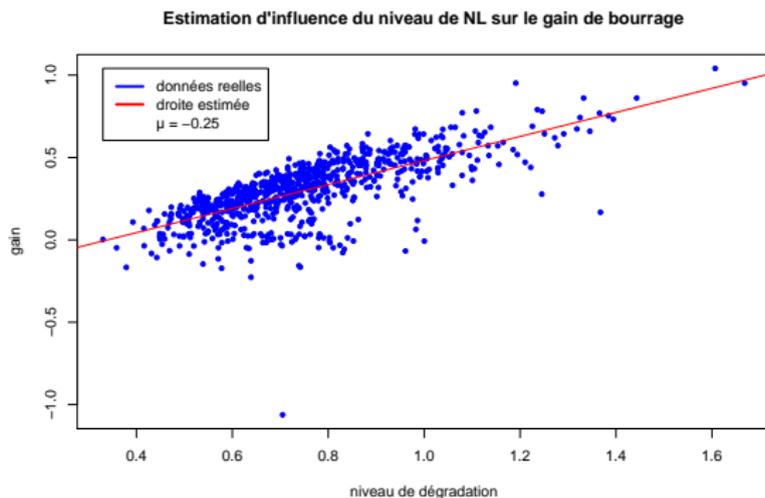
Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

$$\text{gain moyen} = c + b \cdot \{\text{dégradation avant l'intervention}\}$$



Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

	c	b	σ
• avant TGV med	-0.41	0.96	0.20
après TGV med	-0.55	0.98	0.26

- Ces modèles possèdent un R^2 de 0,77 et de 0,63.

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

- Nous proposons une optimisation de la stratégie de maintenance par rapport aux coûts.
- Les coûts suivants sont utilisés dans l'étude :
 - coût d'inspection : 21 €/km ;
 - coût de bourrage : 9500 €/km ;
 - coûts exceptionnels après le passage du niveau DL : 710 000 €/km, (coûts de remplacement de ballast).

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

Les hypothèses faites sur l'évolution du système de maintenance :

- L'état du système est décrit par une variable X_t .
- Surveillance lors des inspections – l'état exact du système est connu.
- Lors d'une inspection :
 - $X_t > H$: planification d'un bourrage avec un délai t_d (plus petit que le pas d'inspection) ;
 - $X_t > DL$: dégradation limite – planification d'une grande opération.

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

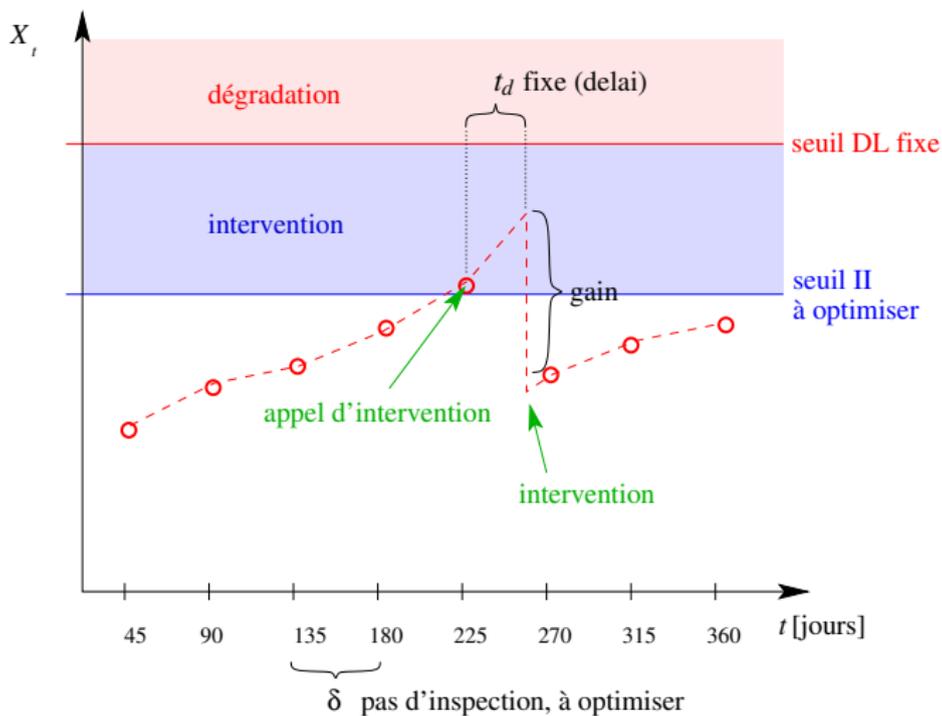
Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié



Probabilités de transition pour $Y_n = X_{n \cdot \delta}$:

- Départ en dessous du seuil l ($x < l$) ; arrivée dans l'intervalle $[a, b]$:

$$P(x, [a, b]) = \int_{a-x}^{b-x} f_{\alpha\delta, \beta}(y) dy,$$

$f_{\cdot, \cdot}(y)$: densité de la loi gamma avec paramètres $\alpha\delta$ et β .

- Départ en dessus de l ($x \geq l$) :

$$P(x, [a, b]) = \int_{a-x-\frac{\alpha}{\beta} \cdot \delta}^{b-x-\frac{\alpha}{\beta} \cdot \delta} g_{-(\mu+\eta(x+\frac{\alpha}{\beta} \cdot \Delta)), \sigma}(y) dy,$$

$g_{\cdot, \cdot}(y)$: densité de la loi gaussienne avec paramètres $-(\mu + \eta(x + \frac{\alpha}{\beta} \cdot \Delta))$ et σ .

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

- $N_i(t)$ nombre d'inspections sur $[0, t]$;
- $N_r(t)$ nombre d'interventions sur $[0, t]$;
- $N_{dl}(t)$ nombre de passages en DL sur $[0, t]$;

C. les coûts correspondants.

$C(t)$, fonction de coût global :

$$C(t) = C_i N_i(t) + C_r N_r(t) + C_{dl} N_{dl}(t).$$

Fonction objectif :

$$\mathbb{E}C_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\mathbb{E}_0(C(t))}{t}.$$

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

- $(Y_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une chaîne de MARKOV ;
- Calcul numérique de la loi stationnaire par discrétisation ;
- Utilisation de la formule :

$$\mathbb{E}C_\infty = \frac{\mathbb{E}_\pi(C(\delta))}{\delta},$$

où π est la loi stationnaire de $(Y_n)_{n \in \mathbb{N}}$;

- Calcul de $\mathbb{E}_\pi(C(\delta))$:
 - $\mathbb{E}(N_i(\delta)) = 1,$
 - $\mathbb{E}(N_r(\delta)) = P_\pi(II \leq Y_0 < DL) = \pi((II, DL[),$
 - $\mathbb{E}(N_{dl}(\delta)) = P_\pi(Y_0 \geq DL) = \pi((DL, \infty[).$

$\mathbb{E}_\pi(C(\delta))$ dépend toujours du seuil II et du pas d'inspection δ , qui sont à optimiser.

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

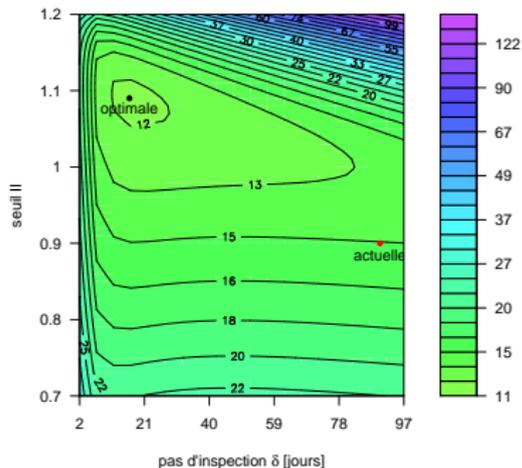
Nombre de bourrages

Modèle mélange

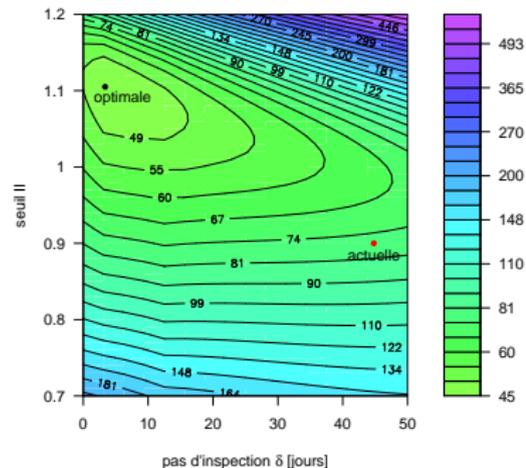
Conclusion

Gamma bivarié

avant TGV med



après TGV med



La stratégie optimale est loin de la maintenance actuelle, mais les coûts sont proches.

Le pas d'inspection est fixé (il est déterminé en fonction de la disponibilité de la voiture de mesure) : ces résultats sont privilégiés par les experts maintenance.

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

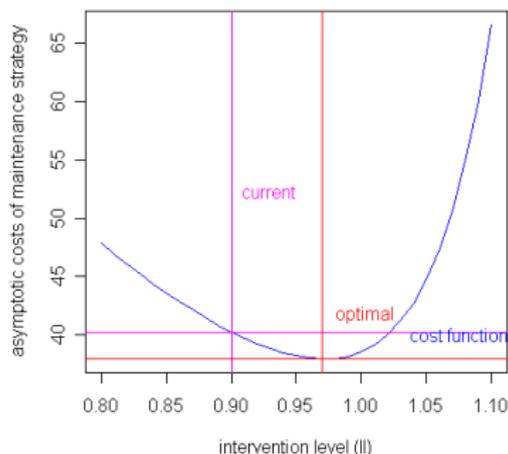
Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

Comparison of maintenance costs



- le niveau II optimisé est proche de la maintenance actuelle,
- le niveau 1,05 ne doit pas être dépassé.

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

- En réalité, le délai d'intervention t_d peut être plus grand que l'intervalle d'inspection $\delta \Rightarrow$ le processus n'est plus markovien,
- En réalité, la régénération de la voie ne dépend pas que de la limite DI. Il y a d'autres indicateurs pour la décision comme par exemple le nombre de bourrages déjà effectués \Rightarrow le processus n'est plus markovien,

\Rightarrow amélioration du premier modèle.

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

- **Modèle bourrage** : planification d'une grande opération après environ 25 bourrages ;
- **Modèle délai intervention** : plus grand délai entre détection et intervention ;
- **Modèle mélange** : Combinaison des deux modèles.

Délais d'intervention : modélisation

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

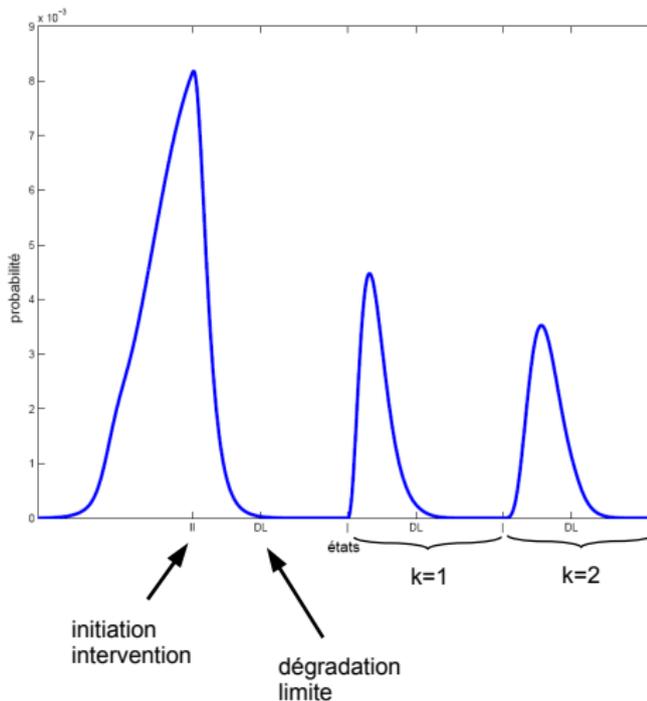
Définition d'un nouveau processus $(Y_i, k_i), i \in \mathbb{N}$.

- Y_i : qualité de la voie,
- $k_i < k_{\max}$ compte le nombre d'inspections entre le dépassement du seuil II et l'instant $i \cdot \delta$.

matrice de transition pour $k_{\max} = 2$:

	k=0	k=1	k=2
k=0	1	3	5, 6, 7
k=1		2	
k=2		4	

Probabilité stationnaire pour $k_{\max} = 2$



Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

Nombre de bourrages : modélisation

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

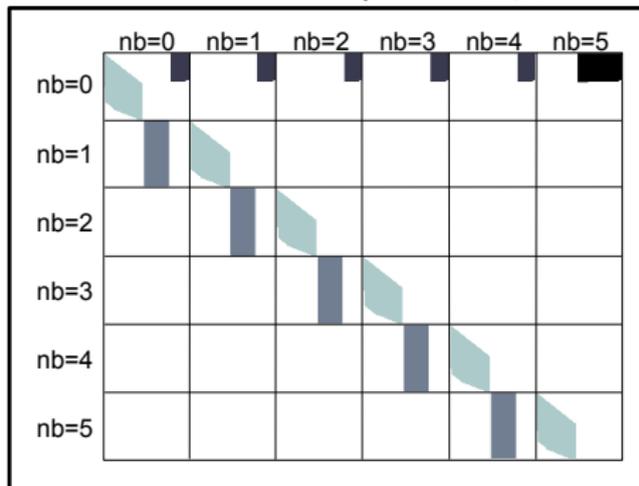
Conclusion

Gamma bivarié

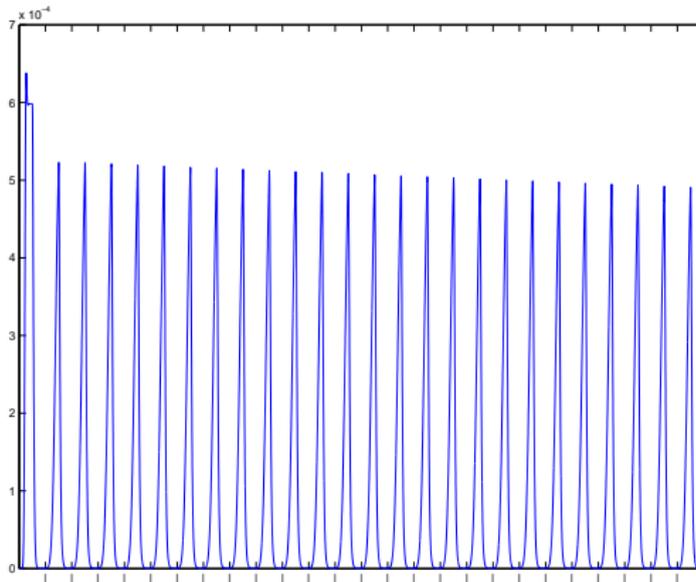
Définition d'un nouveau processus $(Y_i, nb_i), i \in \mathbb{N}$.

- Y_i : qualité de la voie,
- $nb_i < nb_{\max}$ compte le nombre de bourrages depuis la construction de la ligne.
- nb_{\max} se situe autour de 25.
- Si $nb_i = nb_{\max}$ la voie est régénérée.

matrice de transition pour $nb_{\max} = 5$:



Probabilité stationnaire pour $nb_{\max} = 25$:



Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

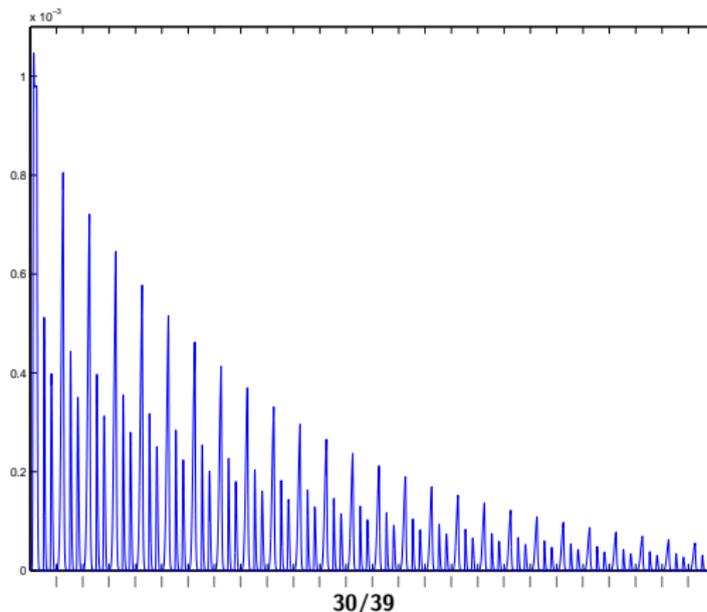
Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

Ce modèle $(Y_i, k_i, nb_i), i \in \mathbb{N}$ combine les deux modèles précédents.

Probabilité stationnaire pour $k_{\max} = 5$ et $nb_{\max} = 25$:



Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

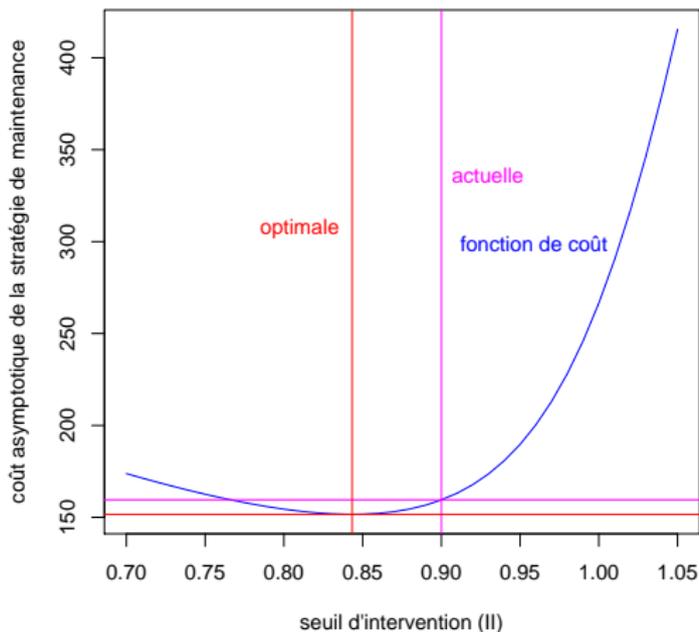
Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

Comparaison des coûts des stratégies de maintenance



Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

- Adaptation et amélioration d'un modèle d'optimisation de maintenance existant basé sur le processus Gamma ;
- Utilisation pour l'évaluation et l'ajustement des stratégies de maintenance ;
- Intérêt d'une utilisation systématique du REX pour définir des politiques de maintenance.
- Réduction pertinente du pas d'inspection après l'ouverture du TGV Méditerranée ;
- Possibilité d'appliquer le modèle à l'optimisation de la maintenance pour IRIS320.

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

- Application sur d'autres lignes à grande vitesse ;
- Étude de l'influence
 - du TGV Duplex
 - de la vitesse (V300 / V320 / V350)sur les coûts de la maintenance ;
- Utilisation d'un processus non-stationnaire pour la dégradation des lignes classiques ;
- Utilisation de plusieurs indicateurs de la géométrie de la voie simultanément.

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

Soient $(Y_t^{(i)})_{t \geq 0}$ avec $i \in \{1, 2, 3\}$ trois processus Gamma univariés indépendants avec $Y_t^{(i)} \sim \Gamma(\alpha_i t, 1)$, $t \geq 0$.
 Pour $b_1 > 0$ et $b_2 > 0$, nous définissons :

$$X_t^{(1)} := (Y_t^{(1)} + Y_t^{(3)}) / b_1,$$

$$X_t^{(2)} := (Y_t^{(2)} + Y_t^{(3)}) / b_2,$$

Le processus $(X_t)_{t \geq 0} = (X_t^{(1)}, X_t^{(2)})_{t \geq 0}$ est alors un processus Gamma-Lévy bivarié avec $X_t^{(i)} \sim \Gamma(a_i t, b_i)$ où

$$a_i = \alpha_i + \alpha_3.$$

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

Deux autres processus ont été construits :

- 1 par une combinaison linéaire d'une mesure d'un processus Lévy bivarié avec des composants complètement dépendants et un deuxième avec des composants indépendants (TDI)
 - 2 par la copule de Lévy-Clayton (CGL).
- Avantages par rapport aux processus TR : la corrélation peut atteindre toutes les valeurs $\in [0, 1]$.
 - mais : pas de formules explicites pour la densité.

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

Utilisation des données NL et NT

Période 2001-2006, tronçon homogène

	Résultats SNCF	Méthode des moments 1	Méthode des moments 2	Max de vraisemblance	Algorithme EM
a_1	0.0622	0.0593	0.0703	0.0645	0.0691
b_1	28.78	27.29	30.60	29.27	—
$\frac{a_1}{b_1}$	2.20×10^{-3}	2.17×10^{-3}	2.30×10^{-3}	2.20×10^{-3}	—
a_2		0.0350	0.0454	0.0449	0.0482
b_2		23.24	27.09	28.17	—
$\frac{a_2}{b_2}$		1.51×10^{-3}	1.68×10^{-3}	1.59×10^{-3}	—
ρ		0.7982	0.7882	0.8791	0.5684

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

On maintient la géométrie lorsque le NL est trop élevé pour pouvoir attendre la prochaine plage d'intervention (on intervient de préférence au printemps et en automne).
Est-ce que les résultats changent si l'on tient compte du NL et du NT ?

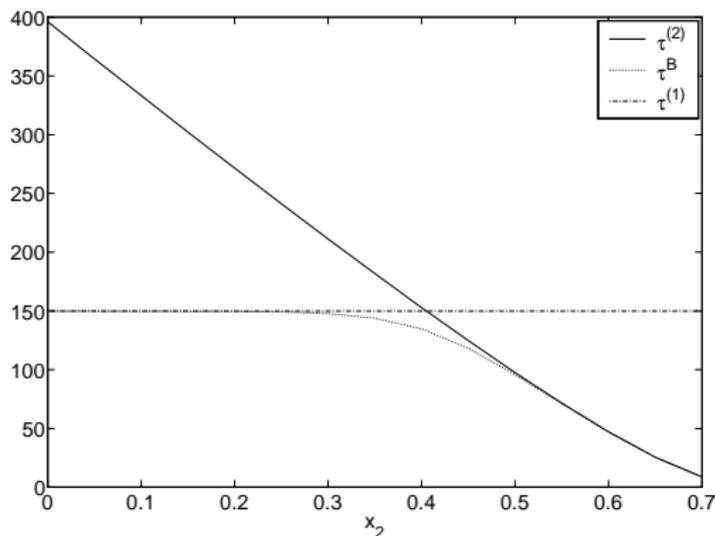
Soit $T^{(i)}$ le temps d'atteinte du seuil de sécurité s_i pour la composante i , x_i est l'état actuel.

On note $y_i := s_i - x_i$ et le réel $\tau_{y_i}^{(i)}$ tels que

$$\tau_{y_i}^{(i)} = \max \left(\tau \geq 0 \text{ tel que } \mathbb{P}_{x_i} \left(T^{(i)} > \tau \right) \geq 1 - \varepsilon \right).$$

Idem pour $\tau_{(y_1, y_2)}^B$.

$$s_1 = 0,9 \text{ et } s_2 = 0,75, x_1 = 0,4 \Rightarrow \tau_{x_1}^{(1)} = 150$$



$x_2 = 0.4 \Rightarrow \tau_{x_2}^{(2)} = 152.9$ et $\tau_{(x_1, x_2)}^B = 134.7$: on se trompe de 15 jours.

$x_2 = 0.5 \Rightarrow \tau_{x_2}^{(2)} = 97.5$ et $\tau_{(x_1, x_2)}^B = 95.9$: on se trompe de 54 jours.

$x_2 = 0.6 \Rightarrow \tau_{x_2}^{(2)} = 47.2$ et $\tau_{(x_1, x_2)}^B = 47.1$: on se trompe de 103 jours.

Contexte

Géométrie de la voie

Modélisation

Interventions

Modélisation

Coûts

Hypothèses

Optimisation

Premiers résultats

Améliorations

Délais d'intervention

Nombre de bourrages

Modèle mélange

Conclusion

Gamma bivarié

- Lorsque x_1 n'est pas trop proche de x_2 , la valeur donnée par $\tau^U = \min(\tau^{(1)}, \tau^{(2)})$ est raisonnable, se contenter de $\tau^{(1)}$ est risqué.
- Lorsque x_1 est proche de x_2 , le modèle bivarié affine les résultats : $\tau^U > \tau^B$ et l'on prévoit la maintenance préventive trop tard avec τ^U au lieu de τ^B .