

Fiabilité des matériaux et des structures 2012
4-5-6 juin 2012 - Chambéry

Identification bayésienne des variables aléatoires pour la modélisation de la pénétration des chlorures dans les structures en béton armé

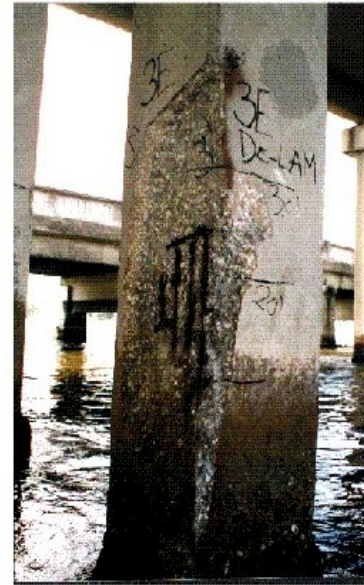
E. BASTIDAS-ARTEAGA, F. SCHOEFS et S. BONNET

LUNAM Université, Université de Nantes-Ecole Centrale Nantes, GeM,
Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, CNRS UMR 6183

emilio.bastidas@univ-nantes.fr

Problématique

- ▶ Corrosion → réduction de la capacité portante des structures :
 - perte de la section transversale des aciers ;
 - perte d'adhérence entre le béton et les aciers et
 - fissuration et éclatement du béton.
- ▶ Dégâts importants après 20 ou 30 ans [Kumar Mehta, 1997] → inspection et réparation.



Modélisation de la pénétration des chlorures → cruciale pour **optimiser les opérations de maintenance** sur ces ouvrages.

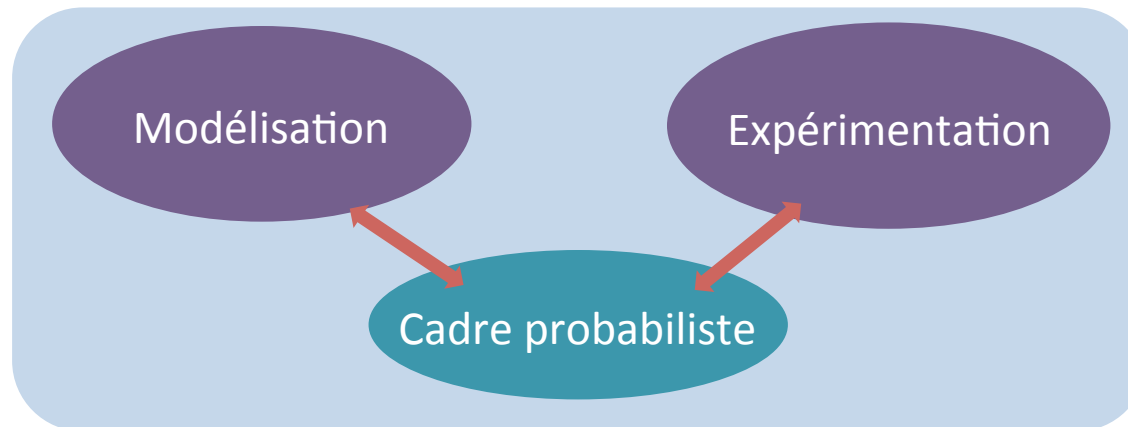
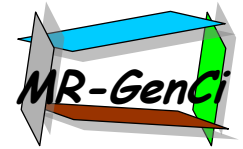
Besoins de la modélisation :

- **Modèles** de dégradation **pertinents** [Saetta et al., 1993], [Samson & Marchand, 2007], [Bastidas-Arteaga et al., 2011]
- **Données** d'entrée **représentatives** du problème traité (aléa lié aux propriétés du matériau, paramètres du modèle, climat, ...)

FUI 2008-2010



Réparation des structures en béton en zone de marnage



Identification de l'aléa →

- propriétés du matériau/paramètres du modèle
- modèle (erreur du modèle)
- actions environnementales (T, HR, ...)

Plan de l'exposé

- Introduction
- Application du théorème de Bayes aux modèles de diffusion
- Identification à partir d'échantillons numériques
- Identification à partir de mesures
- Conclusions et perspectives

Application du théorème de Bayes aux modèles de diffusion

Modèles de diffusion adoptés :

Mise à point de la méthode
[Tuutti, 1982]

$$C(x,t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$$

avec :

- C_s : concentration de chlorures à la surface
- D : coefficient de diffusion effective des ions chlorures

Identification à partir de mesures
réelles [Duracrete, 2000]

$$C(x,t) = C_{s,D} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{k_e k_t k_c D_o (t_o/t)^{n_D} t}} \right) \right]$$

avec :

- $C_{s,D}$: concentration de chlorures à la surface
- D_o : coefficient de diffusion effective des ions chlorures
- n_D : vieillissement
- k_e : type d'environnement
- k_t : méthode de détermination de D_o
- k_c : temps de cure
- t_o : temps \rightarrow mesure de D_o

Application du théorème de Bayes aux modèles de diffusion

Exemple pour le modèle simplifié [Tuutti, 1982]

Si les v.a. D et C_s sont indépendantes, $p(D, C_s) = p(D)p(C_s)$, et la probabilité $p(C(x, t))$ devient :

$$p(C(x, t)) = \sum_{D, C_s} p(C(x, t) | D, C_s) p(D, C_s)$$

La détermination des probabilités conditionnelles s'effectue par apprentissage et inférence avec le logiciel Netica[®]

Les distributions de probabilité à identifier s'obtiennent lorsque l'on introduit les observations, o , dans le problème :

$$p(D | o) = p(D | C(x, t)) p(C(x, t) | o) \quad \text{avec} \quad p(D | C(x, t)) = \frac{p(C(x, t) | D) p(D)}{p(C(x, t))}$$

$$p(C_s | o) = p(C_s | C(x, t)) p(C(x, t) | o) \quad \text{avec} \quad p(C_s | C(x, t)) = \frac{p(C(x, t) | C_s) p(C_s)}{p(C(x, t))}$$

Identification à partir d'échantillons numériques

- Actualisation → **mesures expérimentales**
- Performance et configuration du RB → **échantillons numériques**
- Distributions pour générer les échantillons numériques à partir de simulations (hyp : v.a. gaussiennes) :

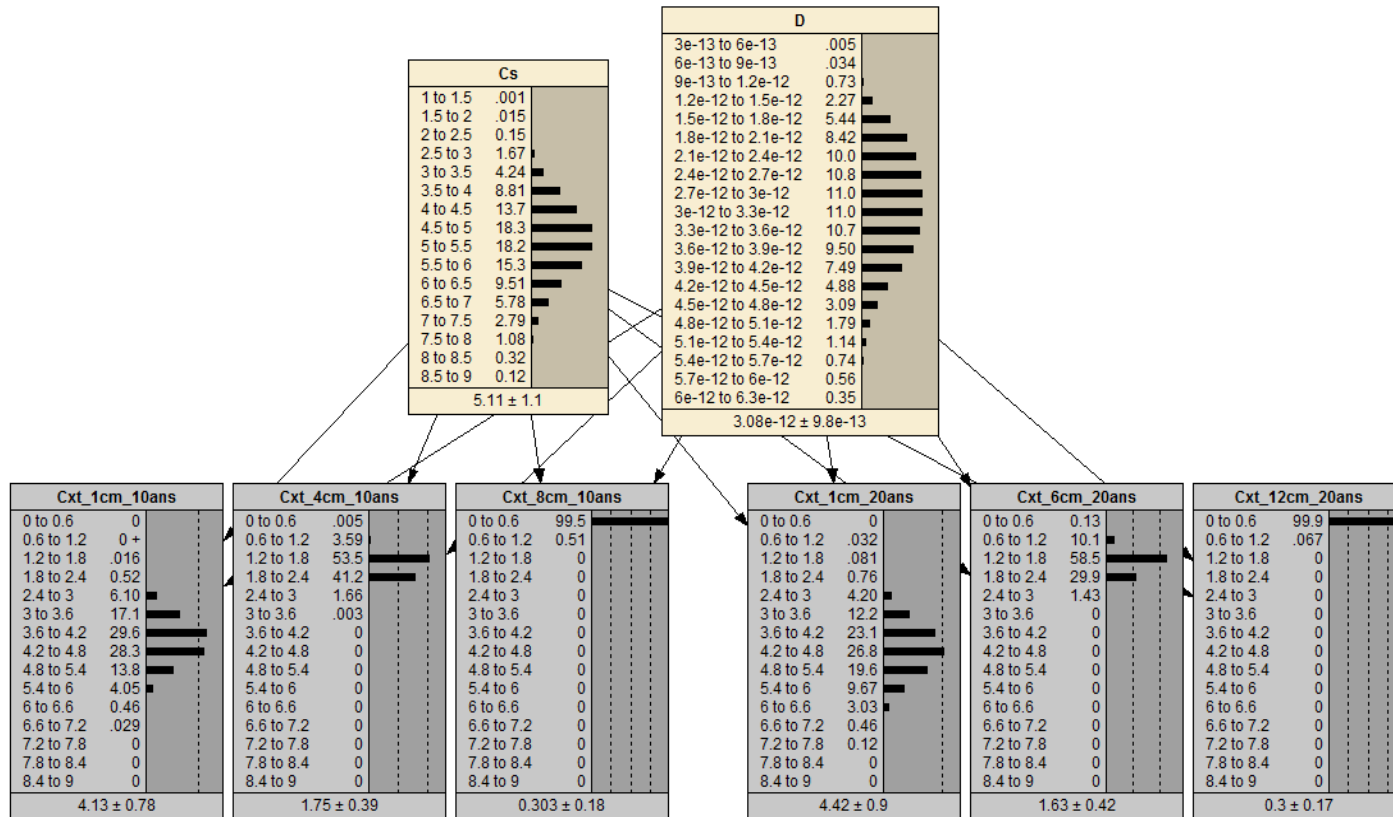
μ_{C_s} (kg/m ³)	σ_{C_s} (kg/m ³)	μ_D (m ² /s)	σ_D (m ² /s)
5	1	$3,00 \times 10^{-12}$	$3,00 \times 10^{-13}$

- Echantillons numériques à $t = 10$ ans et trois profondeurs :

$C(x, t = 10 \text{ ans})$ (kg/m ³)	$x = 1\text{cm}$	$x = 4\text{cm}$	$x = 8\text{cm}$
0.0 - 0.6	0	0.00033	0.992333
0.6 - 1.2	0.0003	0.05467	0.007667
⋮	⋮	⋮	⋮
8.4 - 9.0	0	0	0
Total	1	1	1

Identification à partir d'échantillons numériques

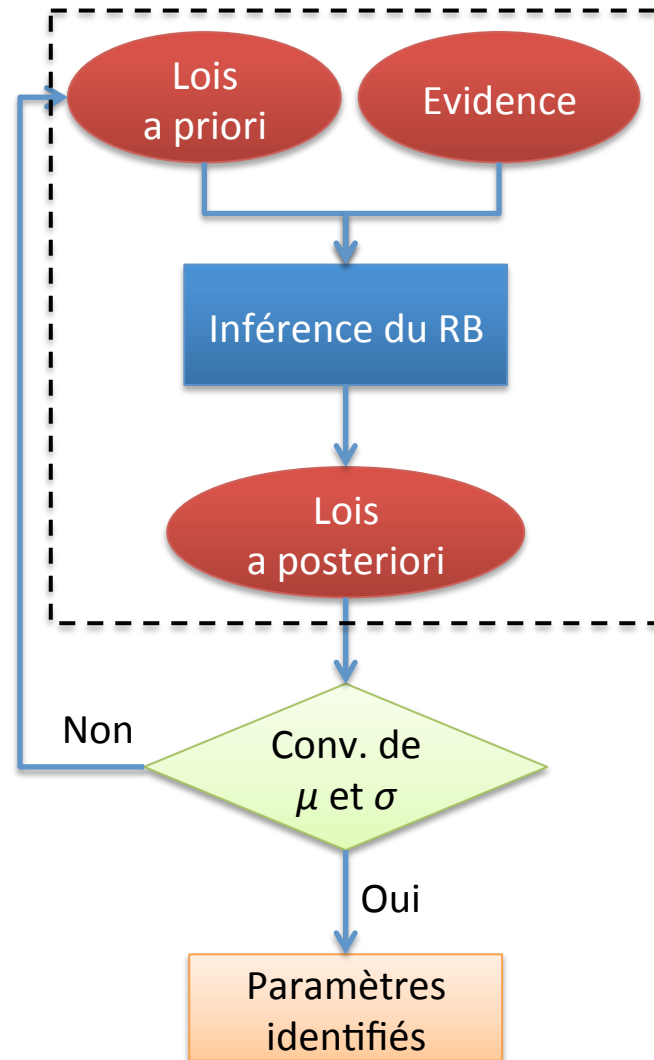
Structure du réseaux bayésien



- Parents → C_s et D
- Enfants →
 - Deux échéances
 - Trois profondeurs

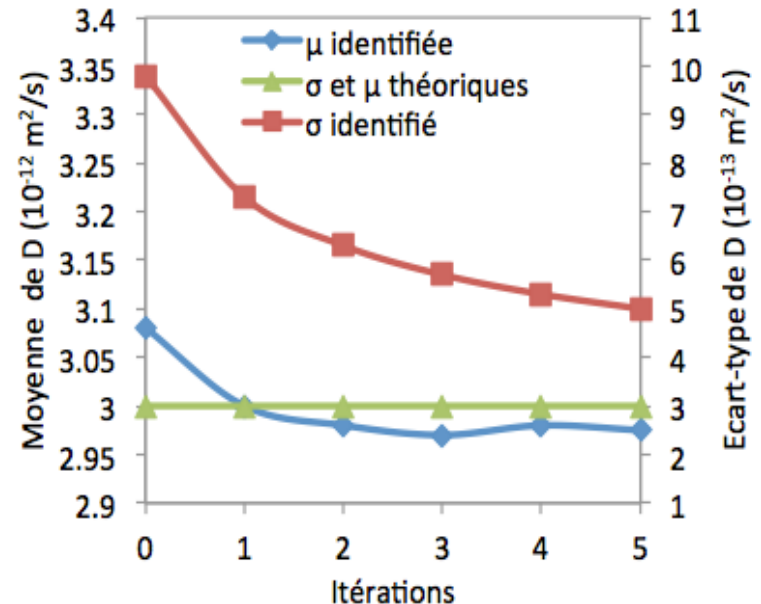
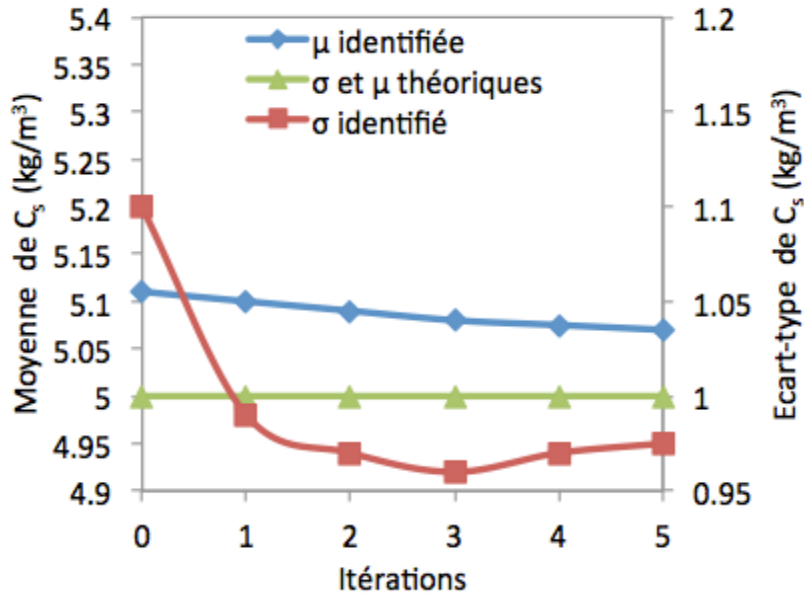
Identification à partir d'échantillons numériques

Identification par des actualisations successives [Nguyen, 2007]



Identification à partir d'échantillons numériques

Résultats :



Par rapport aux résultats théoriques :

- Erreur inférieure à 3% → calcul des moyennes et de l'écart-type de C_s .
- Améliorer l'identification de l'écart-type de D → plus d'itérations ou simulations dans le calcul des TPC

Identification à partir de mesures

Description du problème :

- Construit en 1980 et placé dans un environnement marin.
- Inspection 2007 → profils de chlorures sur poutres placés dans une zone atmosphérique.

Objectif :

Identifier → modèle [Duracrete, 2000]



Pont Ferrycarrig (Irlande)

Définition des v.a. à identifier :

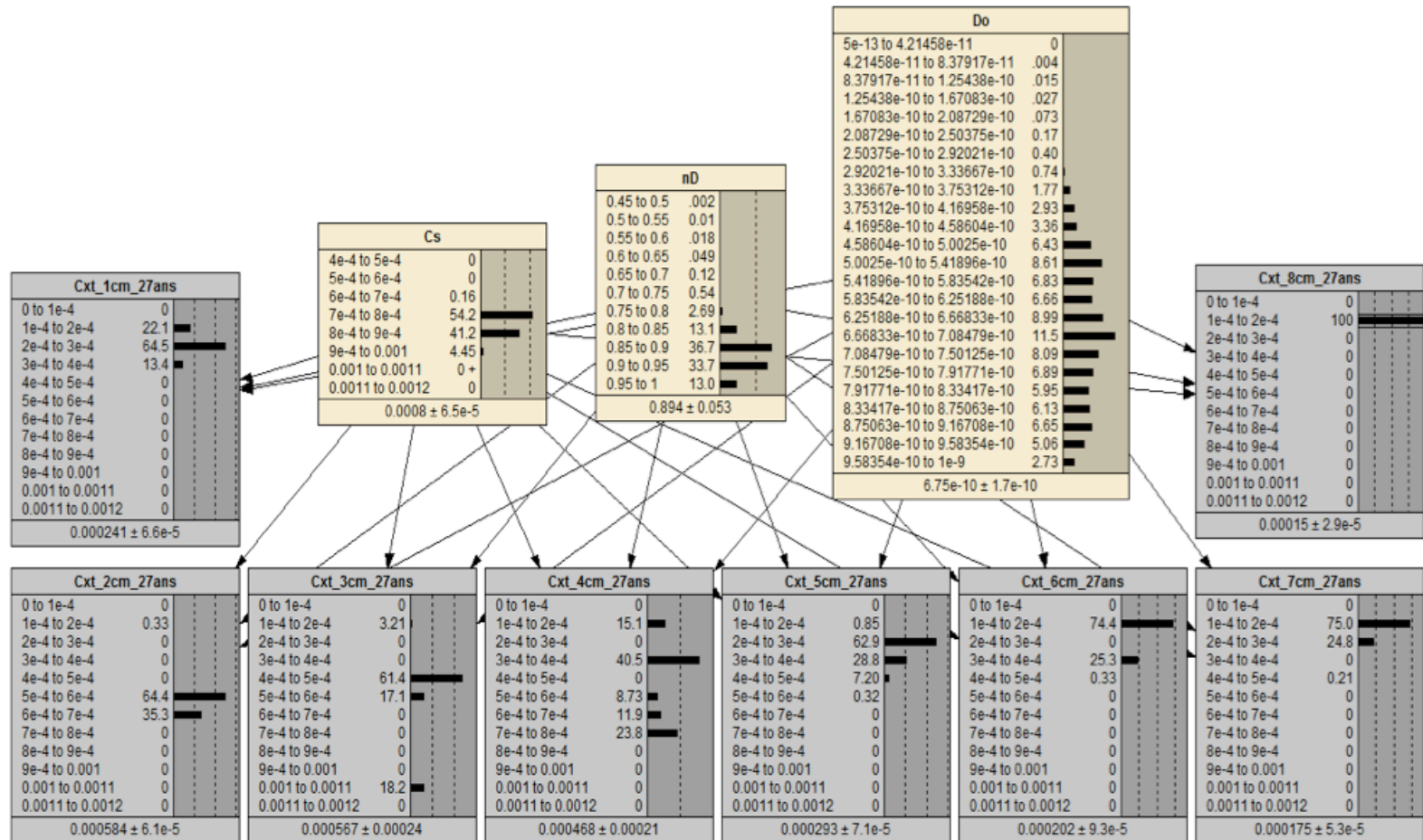
$$C(x, t) = C_{s,D} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{k_e k_t k_c D_o (t_o/t)^{n_D} t}} \right) \right]$$

}

- $k_e = 0.676$ (zone atmosphérique)
- $k_t = 1$ ($D_o \rightarrow$ test de migration)
- $k_c = 0.8$ (temps de cure de 28 jours)
- $t_o = 28$ jours (temps \rightarrow mesure de D_o)

Identification à partir de mesures

Structure du réseaux bayésien



Identification à partir de mesures

Résultats a posteriori de l'identification

Variable	Iteration	Mean	Std. dev
$C_{s,D}$ (% per wt. of concrete)	0	0.0809	0.01
	1	0.0803	0.0078
	2	0.0799	0.0069
	3	0.08	0.0065
	4	0.0801	0.0064
	5	0.0802	0.0064
D_o ($\times 10^{-10}$ m ² /s)	0	4.91	2.8
	1	5.66	2.5
	2	6.38	2
	3	6.75	1.7
	4	6.81	1.5
	5	6.75	1.3
n_D	0	0.804	0.14
	1	0.844	0.11
	2	0.879	0.075
	3	0.894	0.053
	4	0.898	0.044
	5	0.9	0.038

Identification à partir de mesures

Type de distribution de la concentration de chlorures à la surface $C_{s,D}$

Variable	Distribution	Log likelihood
$C_{s,D}$ (/wt. of concrete)	Normal	834.63
	Lognormal	836.47
	Weibull	825.00
	Gamma	835.91
	Beta	835.91

- Log-normale $\rightarrow \mu = 0,08 \sigma = 0,0064$ (% / masse de béton)
- Littérature \rightarrow [Duracrete, 2000], [Vu and Stewart, 2000], [Duprat, 2007]

Identification à partir de mesures

Type de distribution du coefficient de diffusion de chlorures, D_o

Variable	Distribution	Log likelihood
D_o (m ² /s)	Normal	2092.18
	Lognormal	2093.37
	Weibull	2089.73
	Gamma	2093.43
	Beta	2093.44

- Beta → définie dans l'intervalle [0, 1]
- Gamma ou Log-normale → $\mu = 6.75$ $\sigma = 1.3$ ($\times 10^{-10}$ m²/s)
- Littérature :
 - Gamma → [Kirkpatrick et al., 2002]
 - Log-normale → [Wallbank, 1989], [Hoffman et al., 1994], [Enright & Frangopol, 1998]

Identification à partir de mesures

Type de distribution du coefficient de diffusion de chlorures, D_o

Variable	Distribution	Log likelihood
n_D	Normal	195.47
	Lognormal	195.42
	Weibull	189.60
	Gamma	195.46
	Beta	190.70

- $n_D \rightarrow$ défini dans l'intervalle $[0, 1]$
- Beta $\rightarrow \mu = 0.9 \quad \sigma = 0.038$ (paramètres $a = 56.39$ et $b = 6.18$)
- Littérature \rightarrow [Duracrete, 2000]

Conclusions

- Identification des variables d'entrée des modèles probabilistes de pénétration de chlorures → données réelles (Approche bayésien).
- Réseau bayésien → évidence numérique
 - Actualisations successives → améliorer l'identification de μ et σ
- Identification → pont Ferrycarrig (Irlande)
 - 3 variables aléatoires → $C_{s,D}$, D_o et n_D

Perspectives

- Identification de v.a. d'un modèle plus représentatif [Bastidas-Arteaga et al., 2011]
- Considération de la corrélation entre les v.a. et de l'erreur du modèle
- Utilisation de réseaux bayésiens dynamiques [Bensi et al, 2011]

Merci de votre attention !