

Variabilité des propriétés du béton

Caractérisation expérimentale et modélisation probabiliste de la lixiviation

Thomas de Larrard

Laboratoire de Mécanique et Technologie
ENS Cachan

27 septembre 2010

Introduction : contexte

Observation du comportement

- à l'échelle macroscopique



- pour un matériau homogénéisé

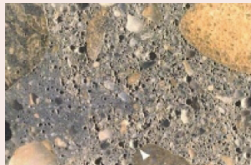
Introduction : contexte

Observation du comportement

- à l'échelle macroscopique



- pour un matériau **homogénéisé**



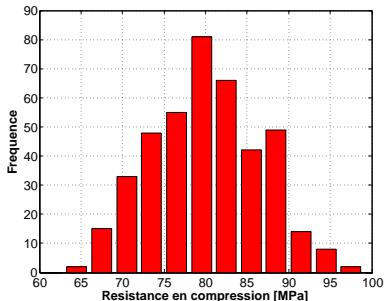
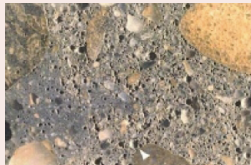
Introduction : contexte

Observation du comportement

- à l'échelle macroscopique



- pour un matériau **homogénéisé**



Variabilité de la
résistance mécanique
pour un ouvrage en BHP
(*viaduc de Millau*)

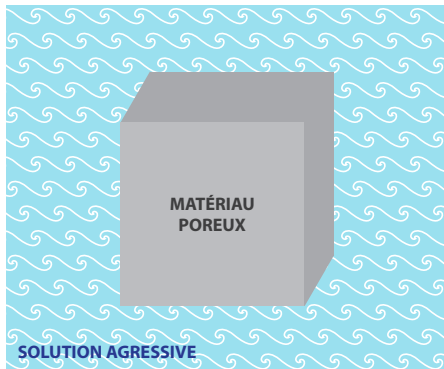
Introduction : problématique

Durabilité d'une structure : application à la lixiviation des matériaux cimentaires



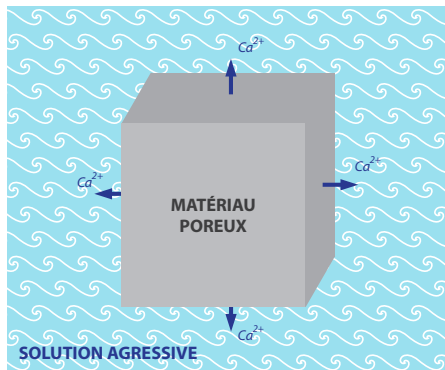
Introduction : problématique

Durabilité d'une structure : application à la lixiviation des matériaux cimentaires



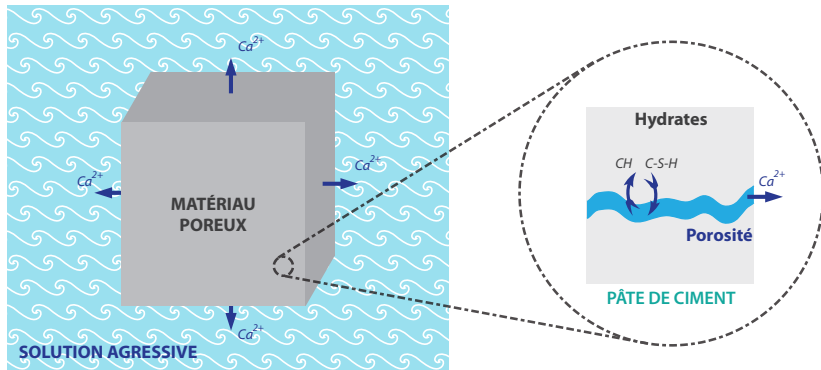
Introduction : problématique

Durabilité d'une structure : application à la lixiviation des matériaux cimentaires



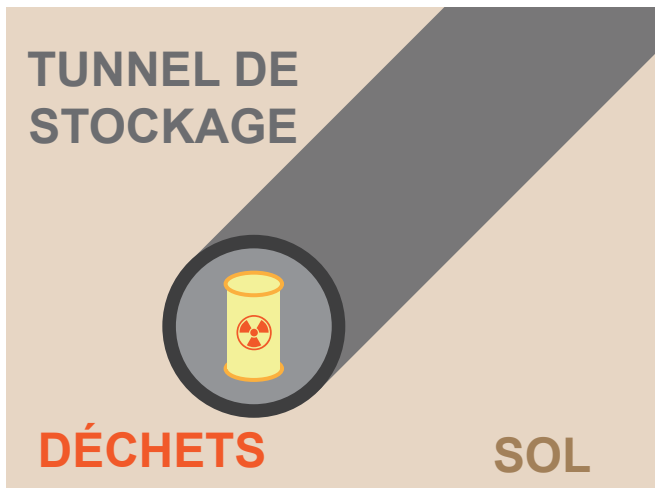
Introduction : problématique

Durabilité d'une structure : application à la lixiviation des matériaux cimentaires



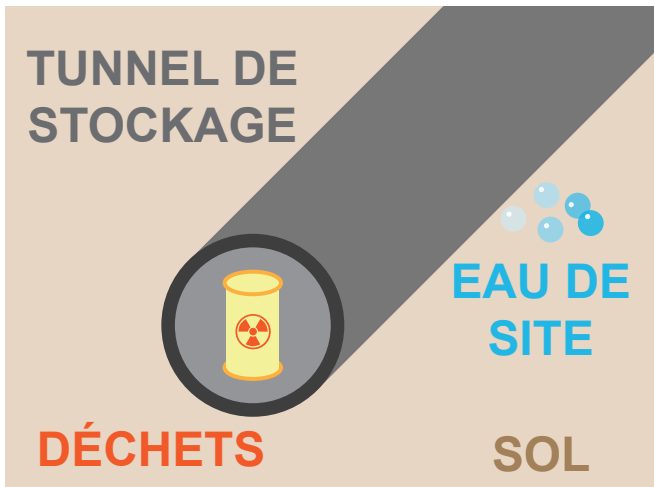
Introduction : problématique

Durée de vie d'un tunnel de stockage de déchets radioactifs



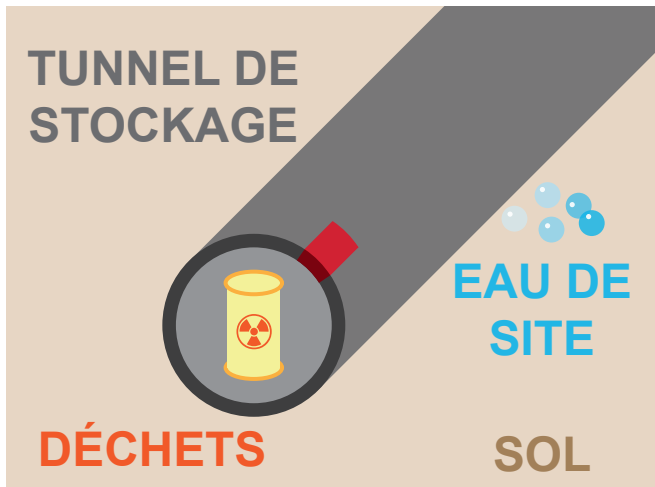
Introduction : problématique

Durée de vie d'un tunnel de stockage de déchets radioactifs



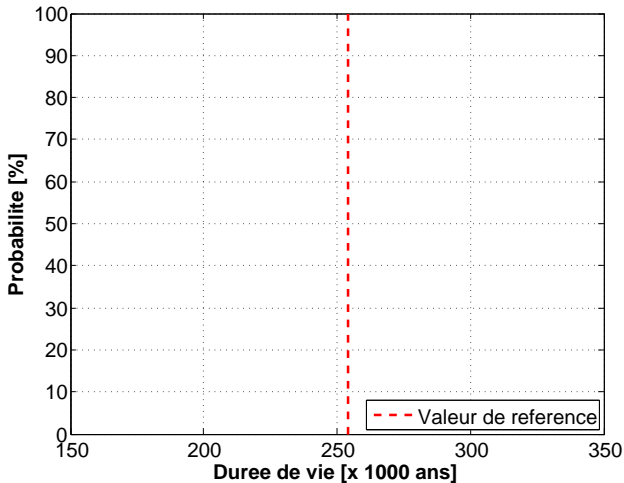
Introduction : problématique

Durée de vie d'un tunnel de stockage de déchets radioactifs



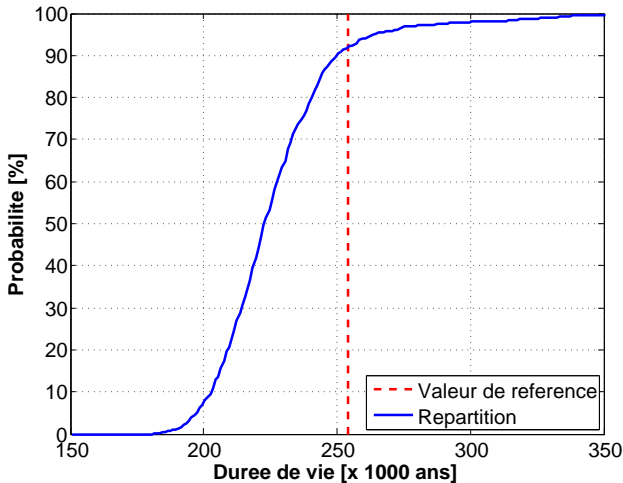
Introduction : problématique

Estimation de la durée de vie d'un ouvrage par simulation numérique



Introduction : problématique

Estimation de la durée de vie d'un ouvrage par simulation numérique



Sommaire

- 1 **Quantification de la variabilité**
 - Étude expérimentale des grandeurs physiques
 - Modélisation de la lixiviation sous température variable
 - Analyse inverse : identification des paramètres du modèle
- 2 **Caractérisation des grandeurs et de leur variabilité**
 - Indépendance des variabilités des paramètres
 - Corrélacion spatiale des champs de variables
- 3 **Propagation et explication de la variabilité**
 - Estimation de la distribution d'une quantité d'intérêt
 - Problèmes à n paramètres : explication des variables

Sommaire

- 1 **Quantification de la variabilité**
 - Étude expérimentale des grandeurs physiques
 - Modélisation de la lixiviation sous température variable
 - Analyse inverse : identification des paramètres du modèle
- 2 **Caractérisation des grandeurs et de leur variabilité**
 - Indépendance des variabilités des paramètres
 - Corrélation spatiale des champs de variables
- 3 **Propagation et explication de la variabilité**
 - Estimation de la distribution d'une quantité d'intérêt
 - Problèmes à n paramètres : explication des variables

Campagne expérimentale APLET / ENS Cachan

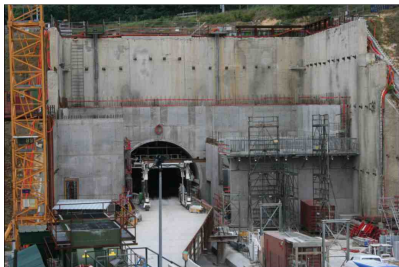


L'esprit de recherche au cœur des réseaux



Campagne expérimentale APPLLET / ENS Cachan

- 40 gâchées étudiées sur 2 chantiers suivis :
 - A1 : tunnel de l'A86, C50/60, **centrale sur chantier**
 - A2 : viaduc de Compiègne, C35/40, **BPE**



Campagne expérimentale APPLLET / ENS Cachan

- 40 gâchées étudiées sur 2 chantiers suivis :

A1 : tunnel de l'A86, C50/60, **centrale sur chantier**

A2 : viaduc de Compiègne, C35/40, **BPE**

Formulation des bétons

<i>[kg/m³]</i>	A1	A2-1	A2-2
Ciment CEM I	350	-	-
Ciment CEM III	-	355	355
Cendres volantes	80	-	-
Filler calcaire	-	-	50
<i>Eau/Liant</i>	<i>0,39</i>	<i>0,49</i>	<i>0,47</i>

Mesure de la variabilité

Comportement mécanique

- **Résistance en compression**
- Résistance en traction
- **Module de Young**
- Propagation d'ondes

Coefficient de variation [%] :

	F_c	F_t	E	C_L
A1	10,5	13,2	6,2	4,2
A2-1	11,3	9,7	7,0	4,4
A2-2	9,0	9,3	5,4	3,9



Mesure de la variabilité

Comportement mécanique

- Résistance en compression
- **Résistance en traction**
- Module de Young
- Propagation d'ondes

Coefficient de variation [%] :

	F_c	F_t	E	C_L
A1	10,5	13,2	6,2	4,2
A2-1	11,3	9,7	7,0	4,4
A2-2	9,0	9,3	5,4	3,9



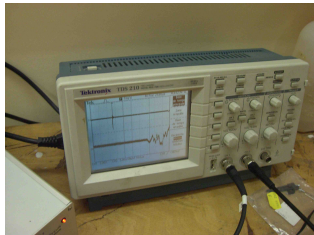
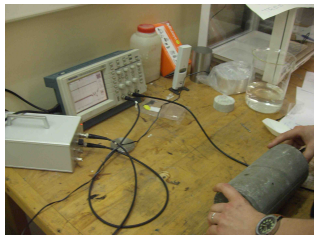
Mesure de la variabilité

Comportement mécanique

- Résistance en compression
- Résistance en traction
- Module de Young
- **Propagation d'ondes**

Coefficient de variation [%] :

	F_c	F_t	E	C_L
A1	10,5	13,2	6,2	4,2
A2-1	11,3	9,7	7,0	4,4
A2-2	9,0	9,3	5,4	3,9



Mesure de la variabilité

Indicateurs de durabilité

- Porosité accessible à l'eau
- Résistivité électrique

Coefficient de variation [%] :

	ϕ		ρ	
	Nb	CV	Nb	CV
A1	40	7,9	120	15,4
A2-1	20	9,0	60	29,4
A2-2	20	4,0	60	10,8



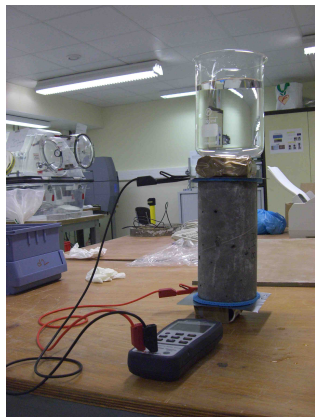
Mesure de la variabilité

Indicateurs de durabilité

- Porosité accessible à l'eau
- **Résistivité électrique**

Coefficient de variation [%] :

	ϕ		ρ	
	Nb	CV	Nb	CV
A1	40	7,9	120	15,4
A2-1	20	9,0	60	29,4
A2-2	20	4,0	60	10,8



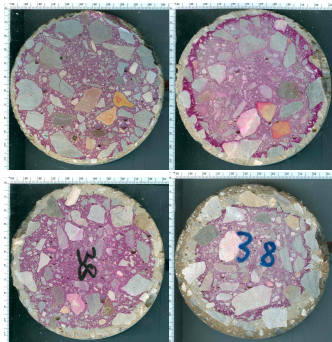
Mesure de la variabilité

Essai de lixiviation

- 4 échéances, révélées à la phénolphtaléine
- nitrate d'ammonium 6-molaire
- variation de la température extérieure

Coefficient de variation [%] :

Jours	28	56	98	210
A1	20,8	19,4	16,8	10,1
A2-1	10,9	8,1	8,0	8,1
A2-2	12,0	12,7	9,9	9,8



Mesure de la variabilité

Essai de lixiviation

- 4 échéances, révélées à la phénolphtaléine
- **nitrate d'ammonium 6-molaire**
- variation de la température extérieure

Coefficient de variation [%] :

<i>Jours</i>	<i>28</i>	<i>56</i>	<i>98</i>	<i>210</i>
A1	20,8	19,4	16,8	10,1
A2-1	10,9	8,1	8,0	8,1
A2-2	12,0	12,7	9,9	9,8



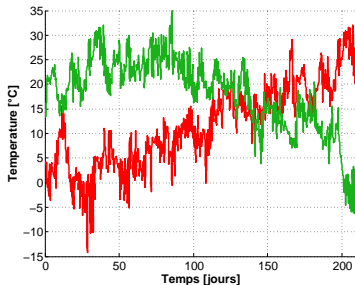
Mesure de la variabilité

Essai de lixiviation

- 4 échéances, révélées à la phénolphtaléine
- nitrate d'ammonium 6-molaire
- **variation de la température extérieure**

Coefficient de variation [%] :

Jours	28	56	98	210
A1	20,8	19,4	16,8	10,1
A2-1	10,9	8,1	8,0	8,1
A2-2	12,0	12,7	9,9	9,8

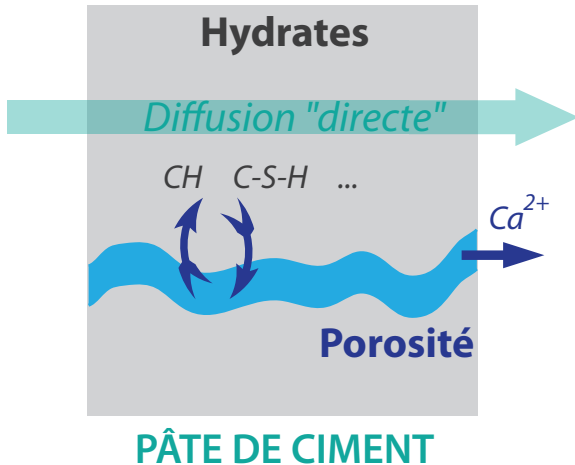


Sommaire

- 1 Quantification de la variabilité**
 - Étude expérimentale des grandeurs physiques
 - **Modélisation de la lixiviation sous température variable**
 - Analyse inverse : identification des paramètres du modèle
- 2 Caractérisation des grandeurs et de leur variabilité**
 - Indépendance des variabilités des paramètres
 - Corrélation spatiale des champs de variables
- 3 Propagation et explication de la variabilité**
 - Estimation de la distribution d'une quantité d'intérêt
 - Problèmes à n paramètres : explication des variables

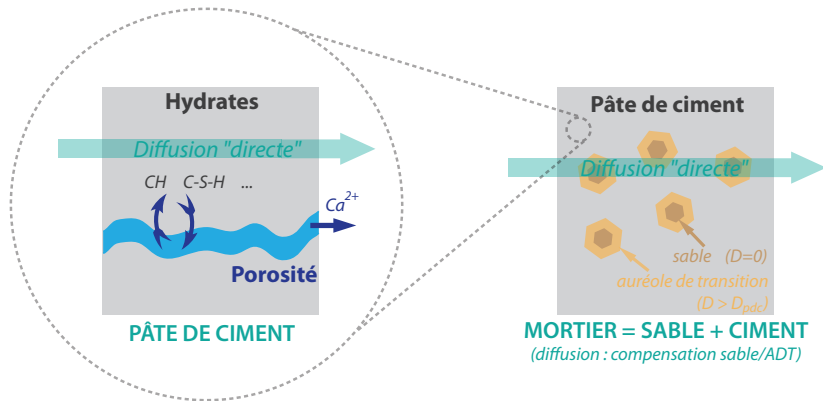
Lixiviation d'un béton : modélisation macroscopique

[Buil et al. 1992, Bourdette 1994, Tognazzi 1998, Nguyen et al. 2006]



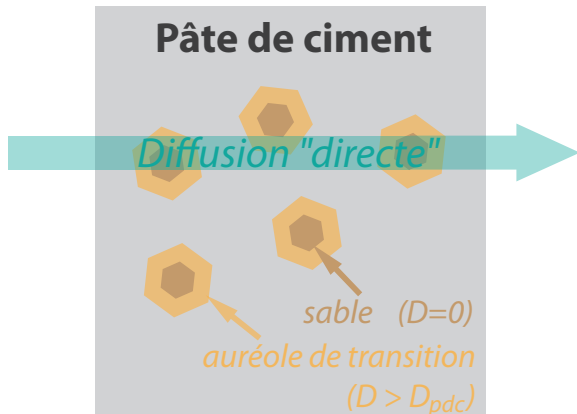
Lixiviation d'un béton : modélisation macroscopique

[Buil et al. 1992, Bourdette 1994, Tognazzi 1998, Nguyen et al. 2006]



Lixiviation d'un béton : modélisation macroscopique

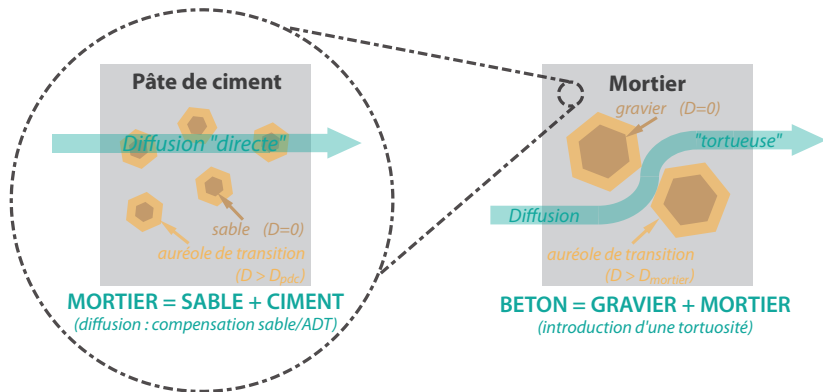
[Buil et al. 1992, Bourdette 1994, Tognazzi 1998, Nguyen et al. 2006]



MORTIER = SABLE + CIMENT
(diffusion : compensation sable/ADT)

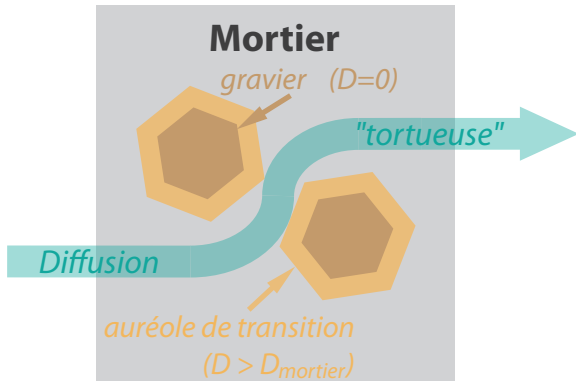
Lixiviation d'un béton : modélisation macroscopique

[Buil et al. 1992, Bourdette 1994, Tognazzi 1998, Nguyen et al. 2006]



Lixiviation d'un béton : modélisation macroscopique

[Buil et al. 1992, Bourdette 1994, Tognazzi 1998, Nguyen et al. 2006]



BETON = GRAVIER + MORTIER
(introduction d'une tortuosité)

Lixiviation d'un béton : modélisation macroscopique

[Buil et al. 1992, Tognazzi 1998, Mainguy et al. 2000, Nguyen et al. 2006]

Conservation de la masse de calcium

$$\frac{\partial(C_{Ca}\phi)}{\partial t} = -\text{div}(-D(\phi)\text{grad}(C_{Ca})) - \frac{\partial S_{Ca}}{\partial t}$$

Équilibre chimique

Diffusion

- Dépendance à la porosité du coefficient de diffusion apparent

$$D(\phi) = \tau f_p D_0 e^{k\phi/f_p f_m}$$

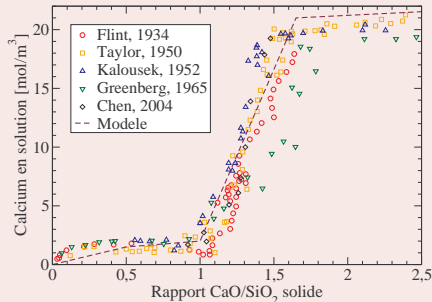
Lixiviation d'un béton : modélisation macroscopique

[Buil et al. 1992, Tognazzi 1998, Mainguy et al. 2000, Nguyen et al. 2006]

Conservation de la masse de calcium

$$\frac{\partial(C_{Ca}\phi)}{\partial t} = -\text{div}(-D(\phi)\text{grad}(C_{Ca})) - \frac{\partial S_{Ca}}{\partial t}$$

Équilibre chimique



Diffusion

- Dépendance à la porosité du coefficient de diffusion apparent

$$D(\phi) = \tau f_p D_0 e^{k\phi/f_p f_m}$$

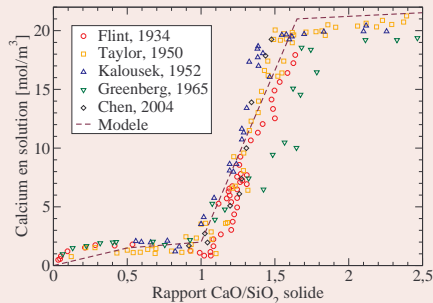
Lixiviation d'un béton : modélisation macroscopique

[Buil et al. 1992, Tognazzi 1998, Mainguy et al. 2000, Nguyen et al. 2006]

Conservation de la masse de calcium

$$\frac{\partial(C_{Ca}\phi)}{\partial t} = -\text{div}(-D(\phi)\text{grad}(C_{Ca})) - \frac{\partial S_{Ca}}{\partial t}$$

Équilibre chimique



Diffusion

- Dépendance à la porosité du coefficient de diffusion apparent

$$D(\phi) = \tau f_p D_0 e^{k\phi/f_p f_m}$$

Prise en compte de la température

- **Equilibre chimique** du calcium solide/liquide en eau pure :

$$C = C_0 \exp\left(-\frac{E_A^C}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right)$$

avec $E_A^C = -3.22 \text{ kJ/mol}$ d'après [Gawin et al. 2009]

- Thermoactivation du **coefficient de diffusion** :

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_A^D}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right)$$

avec $E_A^D = 44 \text{ kJ/mol}$ d'après [Peycelon et al. 2006]

Prise en compte de la température

- **Equilibre chimique** du calcium solide/liquide en eau pure :

$$C = C_0 \exp\left(-\frac{E_A^C}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right)$$

avec $E_A^C = -3.22 \text{ kJ/mol}$ d'après [Gawin et al. 2009]

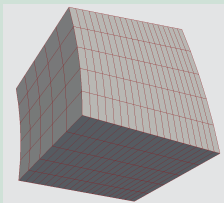
- Thermoactivation du **coefficient de diffusion** :

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_A^D}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right)$$

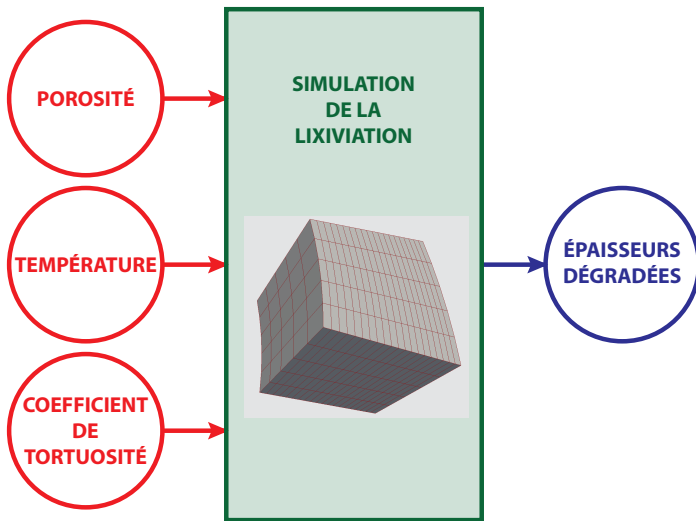
avec $E_A^D = 44 \text{ kJ/mol}$ d'après [Peycelon et al. 2006]

Synthèse de la modélisation aux volumes finis

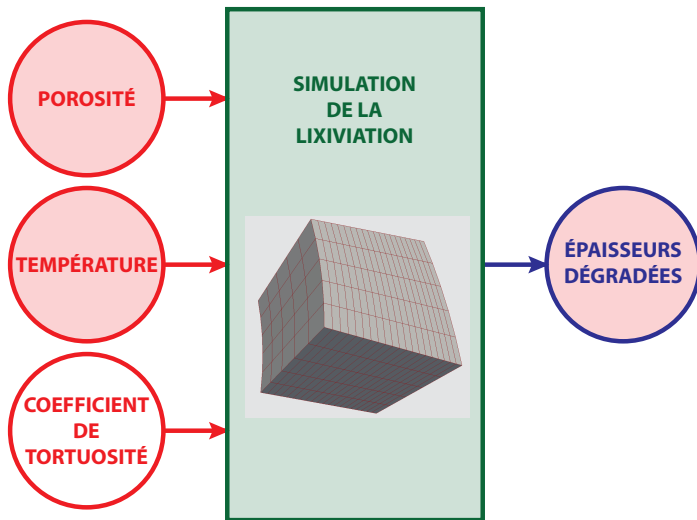
**SIMULATION
DE LA
LIXIVIATION**



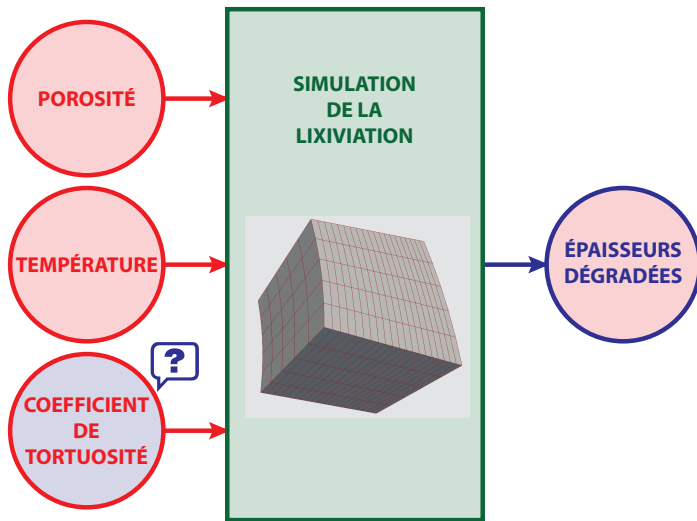
Synthèse de la modélisation aux volumes finis



Synthèse de la modélisation aux volumes finis



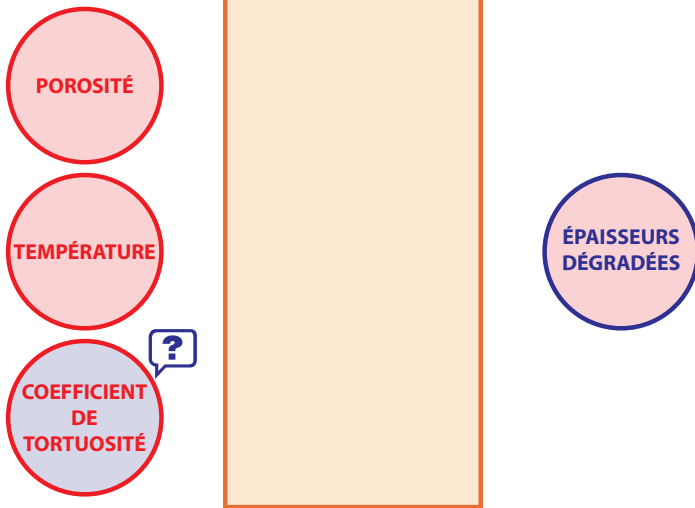
Synthèse de la modélisation aux volumes finis



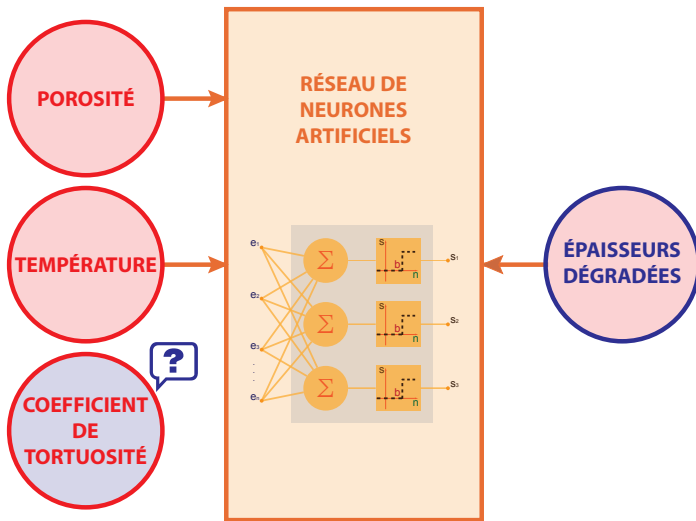
Sommaire

- 1 **Quantification de la variabilité**
 - Étude expérimentale des grandeurs physiques
 - Modélisation de la lixiviation sous température variable
 - **Analyse inverse : identification des paramètres du modèle**
- 2 **Caractérisation des grandeurs et de leur variabilité**
 - Indépendance des variabilités des paramètres
 - Corrélation spatiale des champs de variables
- 3 **Propagation et explication de la variabilité**
 - Estimation de la distribution d'une quantité d'intérêt
 - Problèmes à n paramètres : explication des variables

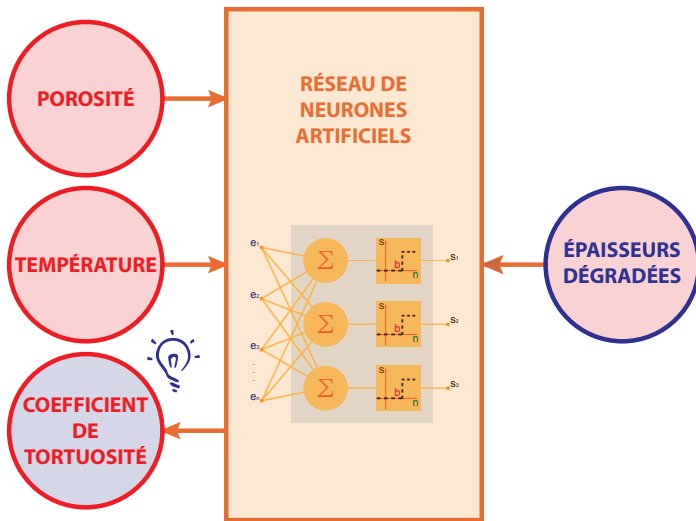
Principe de l'analyse inverse



Principe de l'analyse inverse



Principe de l'analyse inverse

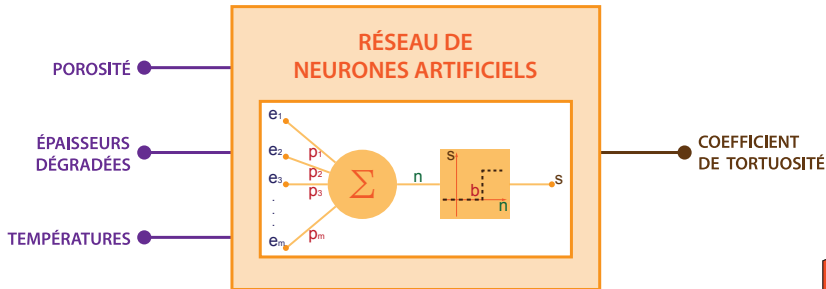


Réseaux de neurones artificiels

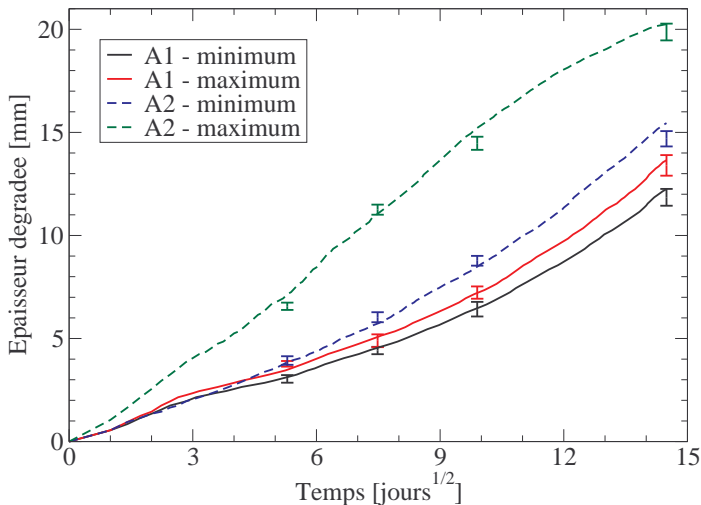
[Hertz et al. 1991, Haykin 1998]

Le réseau de neurones est...

- ... indépendant de la physique du problème ;
- ... entraîné à identifier une inconnue : **apprentissage**.



Identification du coefficient de tortuosité



Synthèse

Quantification de la variabilité

- Caractérisation expérimentale de la variabilité pour les grandeurs mesurables
- Développement d'un outil de simulation pour la lixiviation
- Dépouillement des essais de dégradation accélération par analyse inverse :

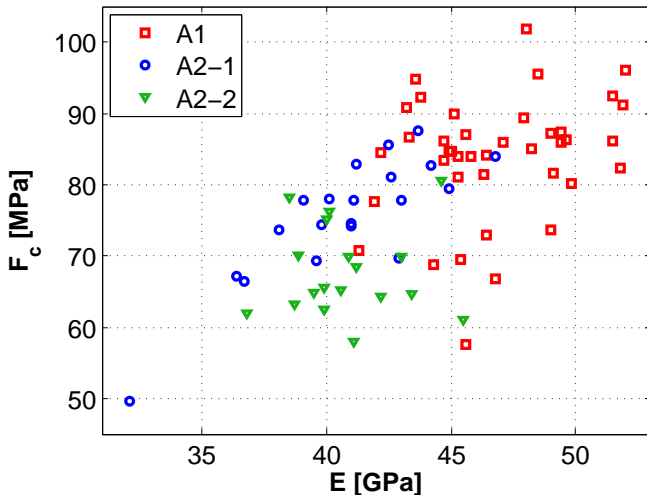
	τ [-]	
	Moyenne	CdV [%]
A1	0,134	15,1
A2-1	0,173	24,5
A2-2	0,173	17,5

Sommaire

- 1 Quantification de la variabilité
 - Étude expérimentale des grandeurs physiques
 - Modélisation de la lixiviation sous température variable
 - Analyse inverse : identification des paramètres du modèle
- 2 Caractérisation des grandeurs et de leur variabilité
 - Indépendance des variabilités des paramètres
 - Corrélation spatiale des champs de variables
- 3 Propagation et explication de la variabilité
 - Estimation de la distribution d'une quantité d'intérêt
 - Problèmes à n paramètres : explication des variables

Recherche de corrélation linéaire

Un exemple : module de Young et résistance en compression

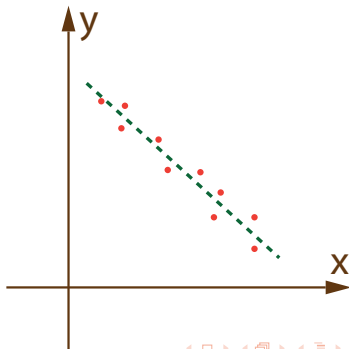


Indicateur de corrélation linéaire

Coefficient de corrélation linéaire de Pearson

$$\rho_{cor} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

$$\rho_{cor} \approx -1$$

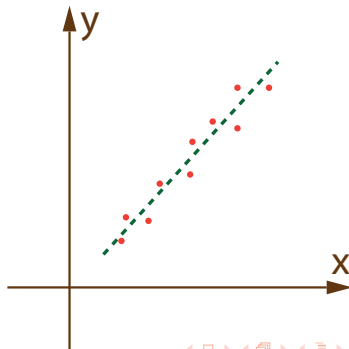


Indicateur de corrélation linéaire

Coefficient de corrélation linéaire de Pearson

$$\rho_{cor} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

$$\rho_{cor} \approx 1$$

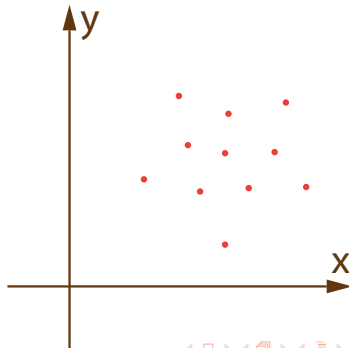


Indicateur de corrélation linéaire

Coefficient de corrélation linéaire de Pearson

$$\rho_{cor} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

$$\rho_{cor} \approx 0$$

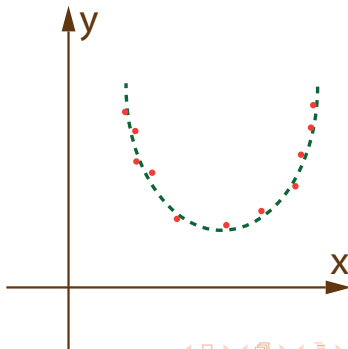


Indicateur de corrélation linéaire

Coefficient de corrélation linéaire de Pearson

$$\rho_{cor} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

$$\rho_{cor} \approx 0$$

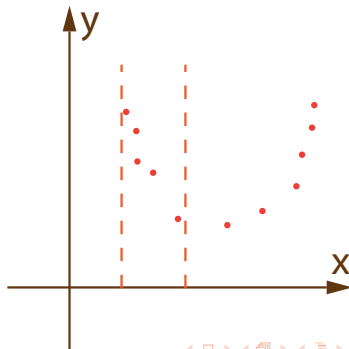


Indicateur de corrélation linéaire

Coefficient de corrélation linéaire de Pearson

$$\rho_{cor} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

$$\rho_{cor} = ?$$

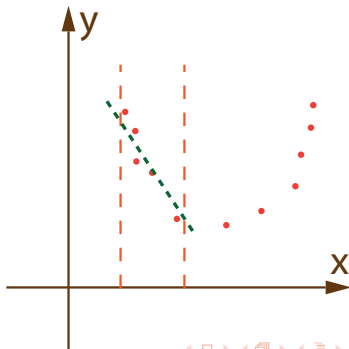


Indicateur de corrélation linéaire

Coefficient de corrélation linéaire de Pearson

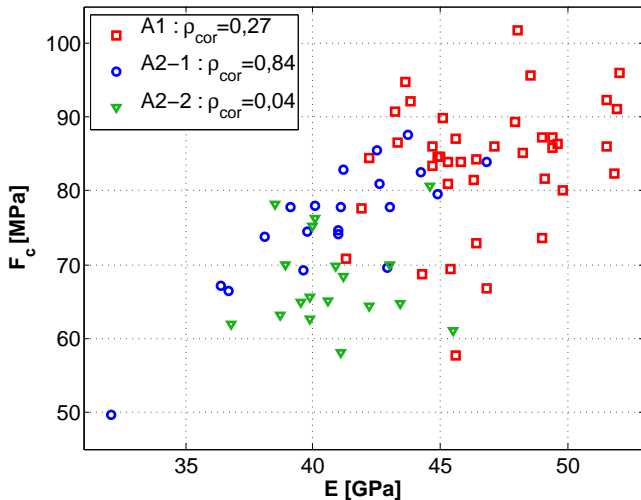
$$\rho_{cor} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

$$\rho_{cor} = ?$$



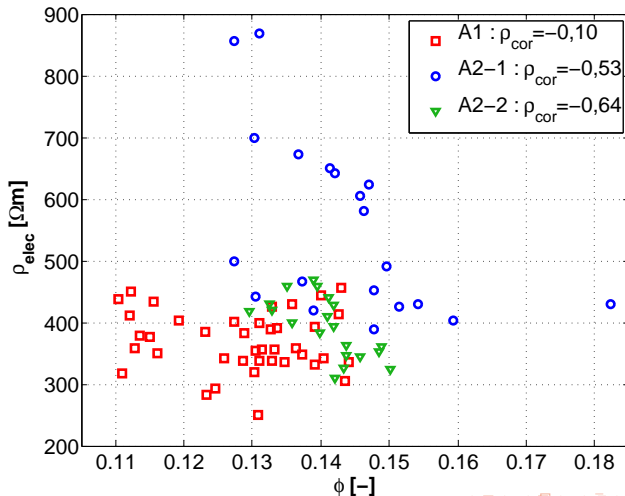
Recherche de corrélation linéaire

Quelques exemples...



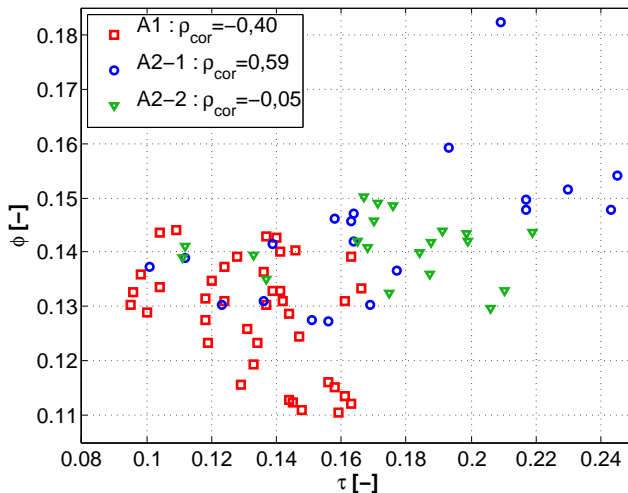
Recherche de corrélation linéaire

Quelques exemples...



Recherche de corrélation linéaire

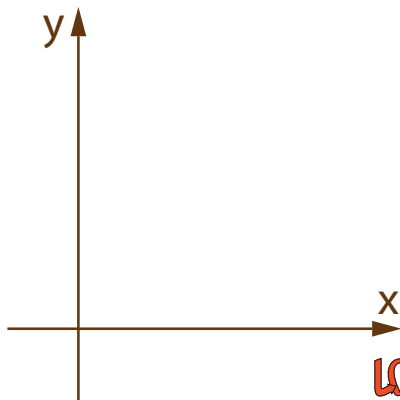
Quelques exemples...



Corrélations entre plusieurs paramètres : analyse en composantes principales

[Jolliffe 2002]

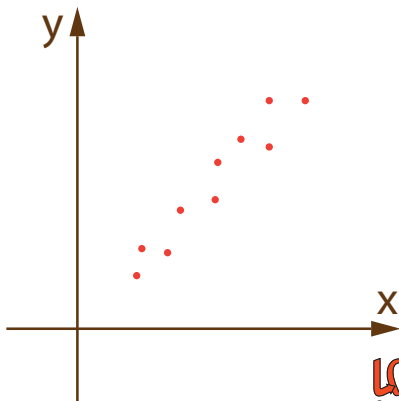
- 1 Variables initiales
- 2 Variabilité du système
- 3 Nouvelles variables :
*combinaison linéaire des
variables initiales*



Corrélations entre plusieurs paramètres : analyse en composantes principales

[Jolliffe 2002]

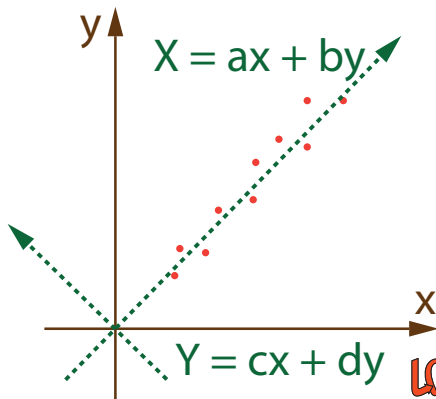
- 1 Variables initiales
- 2 Variabilité du système
- 3 Nouvelles variables :
*combinaison linéaire des
variables initiales*



Corrélations entre plusieurs paramètres : analyse en composantes principales

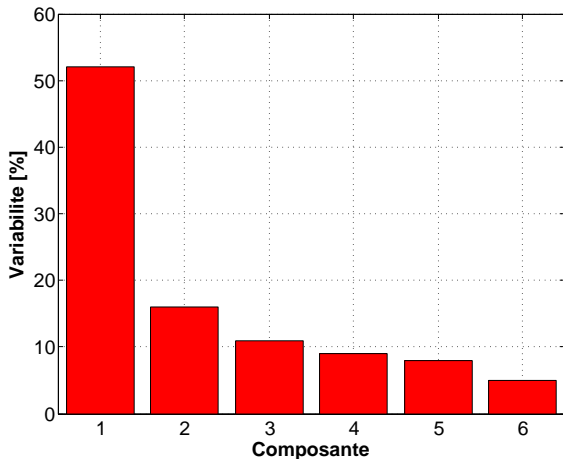
[Jolliffe 2002]

- 1 Variables initiales
- 2 Variabilité du système
- 3 Nouvelles variables :
combinaison linéaire des variables initiales



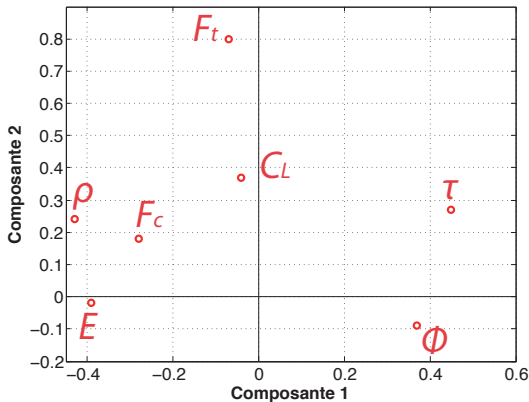
Analyse en composantes principales

Résultats et exemple d'application



Analyse en composantes principales

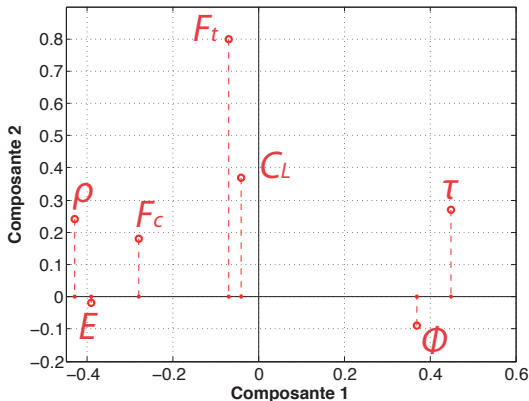
Résultats et exemple d'application



$$F(\tau, \phi, C_L, F_t, F_c, E, \rho) = a\tau + b\phi + cC_L + dF_t + eF_c + gE + h\rho = 0$$

Analyse en composantes principales

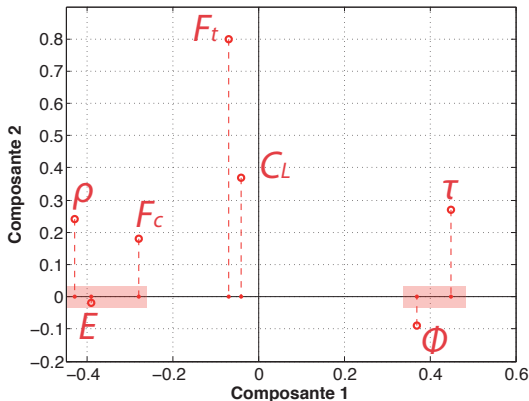
Résultats et exemple d'application



$$F(\tau, \phi, C_L, F_t, F_c, E, \rho) = a\tau + b\phi + cC_L + dF_t + eF_c + gE + h\rho = 0$$

Analyse en composantes principales

Résultats et exemple d'application

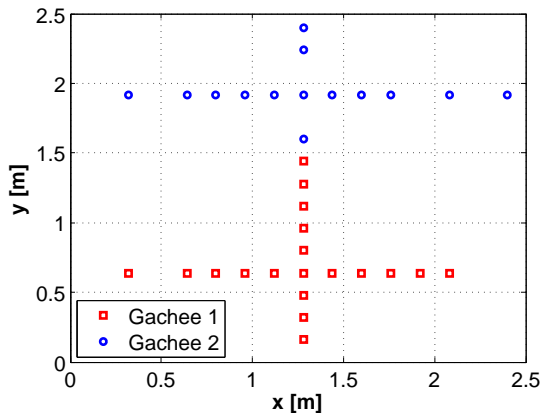


$$F(\tau, \phi, C_L, F_t, F_c, E, \rho) = a\tau + b\phi + cC_L + dF_t + eF_c + gE + h\rho = 0$$

Sommaire

- 1 **Quantification de la variabilité**
 - Étude expérimentale des grandeurs physiques
 - Modélisation de la lixiviation sous température variable
 - Analyse inverse : identification des paramètres du modèle
- 2 **Caractérisation des grandeurs et de leur variabilité**
 - Indépendance des variabilités des paramètres
 - **Corrélation spatiale des champs de variables**
- 3 **Propagation et explication de la variabilité**
 - Estimation de la distribution d'une quantité d'intérêt
 - Problèmes à n paramètres : explication des variables

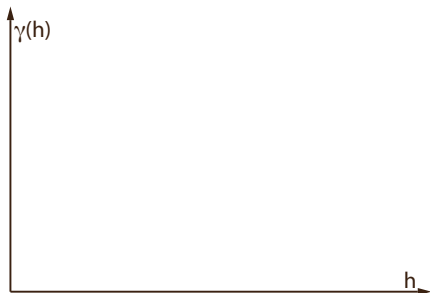
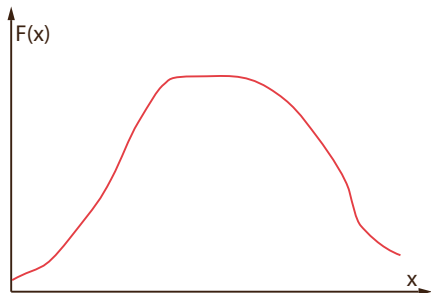
Voile expérimental (chantier A1)



Voile expérimental : fonction de covariance

Variogramme : exploitation pour une unique réalisation du champ aléatoire

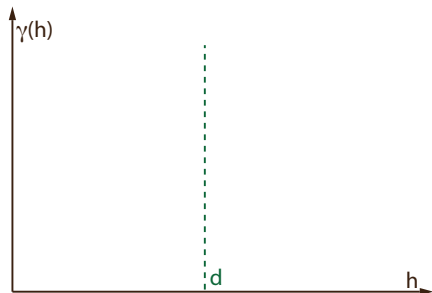
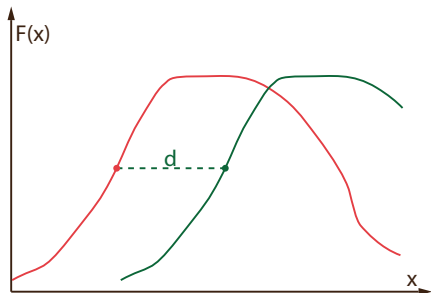
[Serra 1967, Jeulin 2000]



Voile expérimental : fonction de covariance

Variogramme : exploitation pour une unique réalisation du champ aléatoire

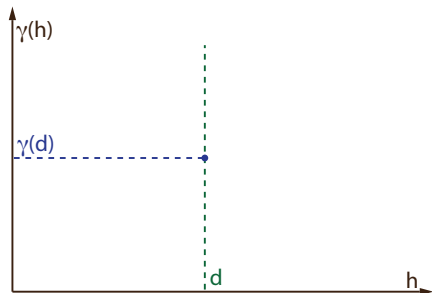
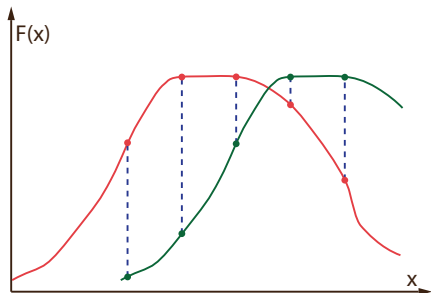
[Serra 1967, Jeulin 2000]



Voile expérimental : fonction de covariance

Variogramme : exploitation pour une unique réalisation du champ aléatoire

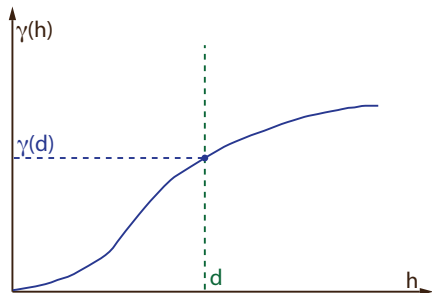
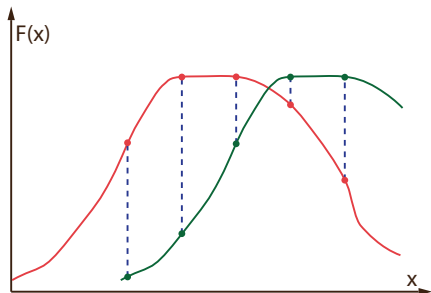
[Serra 1967, Jeulin 2000]



Voile expérimental : fonction de covariance

Variogramme : exploitation pour une unique réalisation du champ aléatoire

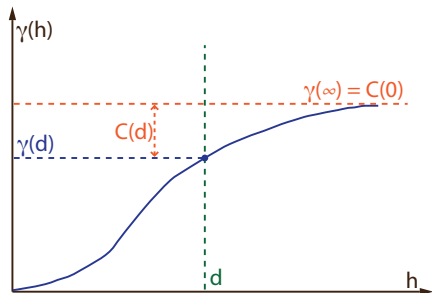
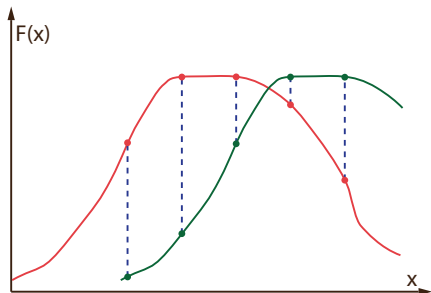
[Serra 1967, Jeulin 2000]



Voile expérimental : fonction de covariance

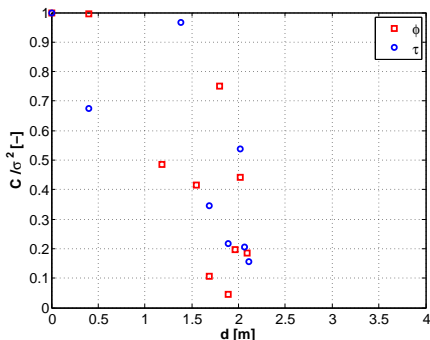
Variogramme : exploitation pour une unique réalisation du champ aléatoire

[Serra 1967, Jeulin 2000]



Fonction de covariance

Identification des longueurs de corrélation



Hypothèse

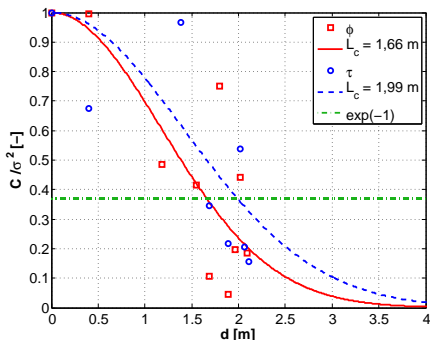
- Fonction de corrélation :

$$C(d) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{d^2}{L_c^2}\right)$$

- Paramètre de corrélation :
longueur de corrélation L_c

Fonction de covariance

Identification des longueurs de corrélation



Hypothèse

- Fonction de corrélation :

$$C(d) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{d^2}{L_c^2}\right)$$

- Paramètre de corrélation :
longueur de corrélation L_c

Synthèse

Hypothèses

- 1 Variabilité d'une grandeur indépendante des autres
- 2 Champs aléatoires spatialement corrélés :

$$C(\vec{x}_i, \vec{x}_j) = V \exp\left(-\frac{\|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|^2}{L_c^2}\right)$$

- 3 Longueur de corrélation de l'ordre de grandeur du mètre

Sommaire

- 1 **Quantification de la variabilité**
 - Étude expérimentale des grandeurs physiques
 - Modélisation de la lixiviation sous température variable
 - Analyse inverse : identification des paramètres du modèle
- 2 **Caractérisation des grandeurs et de leur variabilité**
 - Indépendance des variabilités des paramètres
 - Corrélation spatiale des champs de variables
- 3 **Propagation et explication de la variabilité**
 - Estimation de la distribution d'une quantité d'intérêt
 - Problèmes à n paramètres : explication des variables

Propagation de la variabilité

Choix d'une méthode d'investigation

- 1 Modèle probabiliste paramétrique :
 - Modèle déterministe
 - Paramètres variables
- 2 Méthode d'intégration directe : **Méthode de Monte-Carlo**
[Metropolis et al. 1949, Caflisch 1998]

$$\int_{\Omega} \Psi(\omega) dP(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Psi(\omega_i) + o\left(\frac{\sigma_{\Psi}}{\sqrt{N}}\right)$$

Motivation du choix

- méthode non-intrusive
- erreur contrôlée par le nombre de réalisations

Propagation de la variabilité

Choix d'une méthode d'investigation

- 1 Modèle probabiliste paramétrique :
 - Modèle déterministe
 - Paramètres variables
- 2 Méthode d'intégration directe : **Méthode de Monte-Carlo**
[Metropolis et al. 1949, Caflisch 1998]

$$\int_{\Omega} \Psi(\omega) dP(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Psi(\omega_i) + o\left(\frac{\sigma_{\Psi}}{\sqrt{N}}\right)$$

Motivation du choix

- méthode non-intrusive
- erreur contrôlée par le nombre de réalisations

Propagation de la variabilité

Choix d'une méthode d'investigation

- 1 Modèle probabiliste paramétrique :
 - Modèle déterministe
 - Paramètres variables
- 2 Méthode d'intégration directe : **Méthode de Monte-Carlo**
[Metropolis et al. 1949, Caflisch 1998]

$$\int_{\Omega} \Psi(\omega) dP(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Psi(\omega_i) + o\left(\frac{\sigma_{\Psi}}{\sqrt{N}}\right)$$

Motivation du choix

- méthode non-intrusive
- erreur contrôlée par le nombre de réalisations

Décomposition modale de Karhunen-Loève

Objectif

Génération d'un champ aléatoire garantissant :

- 1 Réalisations indépendantes les unes des autres
- 2 Champ à corrélation spatiale

$$f(\vec{x}, \omega) = \bar{f}(\vec{x}) + \sum_{i=0}^{+\infty} \sqrt{\lambda_i} \phi_i(\vec{x}) \xi_i(\omega)$$

- Découplage des variables spatiales et stochastiques
- (λ_i, ϕ_i) : modes propres du noyau de covariance
- ξ_i : variables aléatoires décorrélées

Décomposition modale de Karhunen-Loève

Objectif

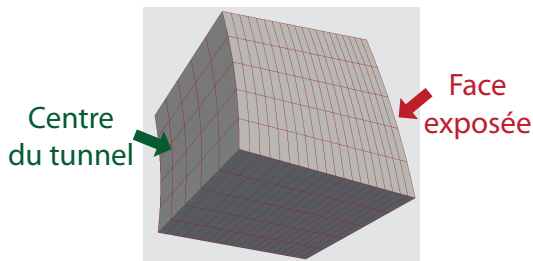
Génération d'un champ aléatoire garantissant :

- 1 Réalisations indépendantes les unes des autres
- 2 Champ à corrélation spatiale

$$f(\vec{x}, \omega) = \bar{f}(\vec{x}) + \sum_{i=0}^{+\infty} \sqrt{\lambda_i} \phi_i(\vec{x}) \xi_i(\omega)$$

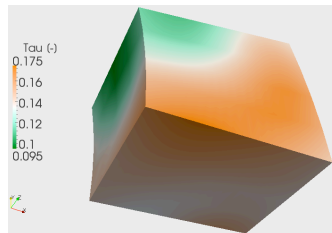
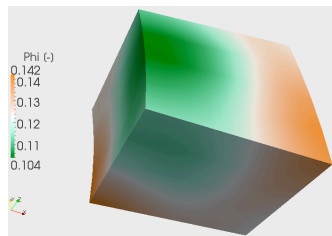
- Découplage des variables **spatiales** et **stochastiques**
- (λ_i, ϕ_i) : modes propres du noyau de covariance
- ξ_i : variables aléatoires décorrélées

Propagation du front de dégradation



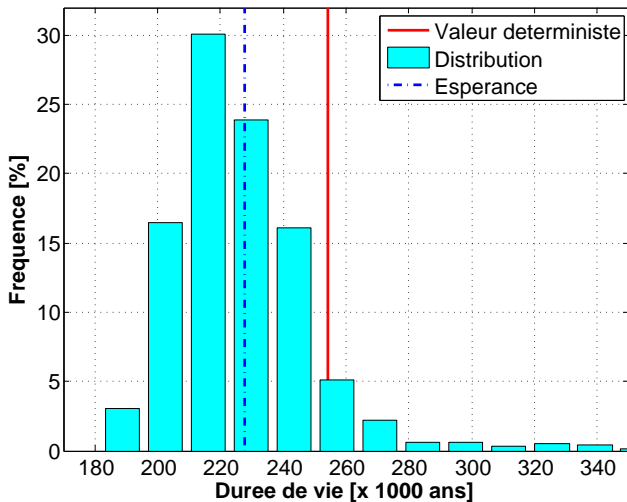
Hypothèses

- Structure de 1 m de côté
- 500 volumes de contrôle
- Flux nul sur les faces latérales

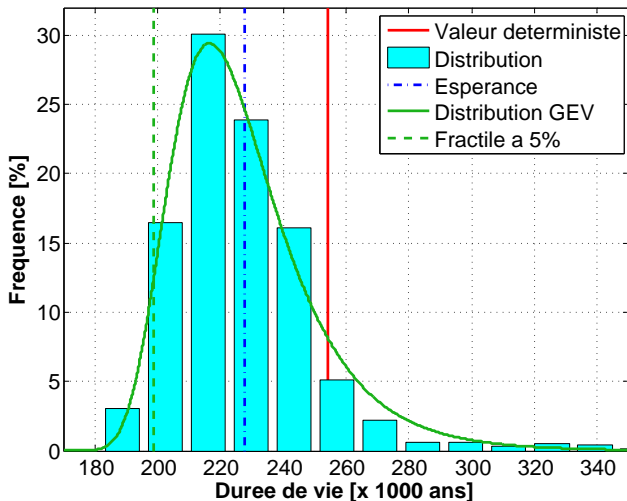


Propagation du front de dégradation

Distribution des durées de vie



Distribution des durées de vie



Étude de l'influence de la longueur de corrélation

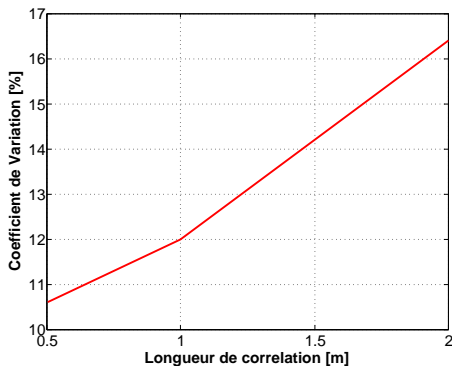
CdV [%]

ϕ	8
τ	15
$L_c = 0,5$ m	10,6
$L_c = 1,0$ m	12,0
$L_c = 2,0$ m	16,4

Par rapport à $L_c = 0,5$ m

CdV

$L_c \times 2$	+ 13,2%
$L_c \times 4$	+ 54,7%

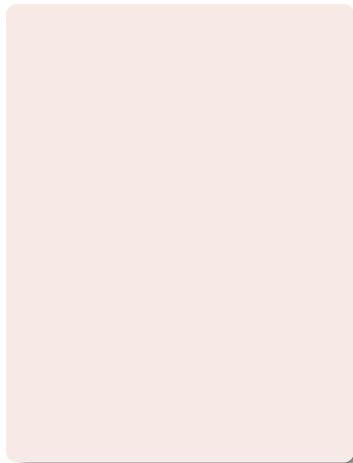
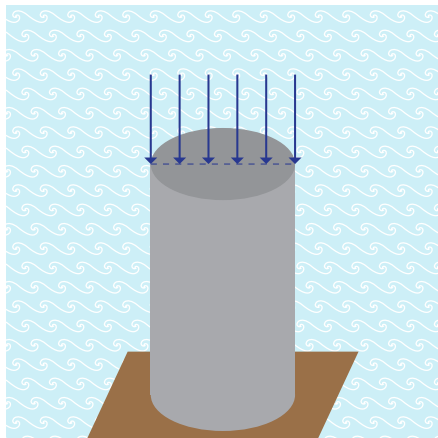


Sommaire

- 1 **Quantification de la variabilité**
 - Étude expérimentale des grandeurs physiques
 - Modélisation de la lixiviation sous température variable
 - Analyse inverse : identification des paramètres du modèle
- 2 **Caractérisation des grandeurs et de leur variabilité**
 - Indépendance des variabilités des paramètres
 - Corrélacion spatiale des champs de variables
- 3 **Propagation et explication de la variabilité**
 - Estimation de la distribution d'une quantité d'intérêt
 - Problèmes à n paramètres : explication des variables

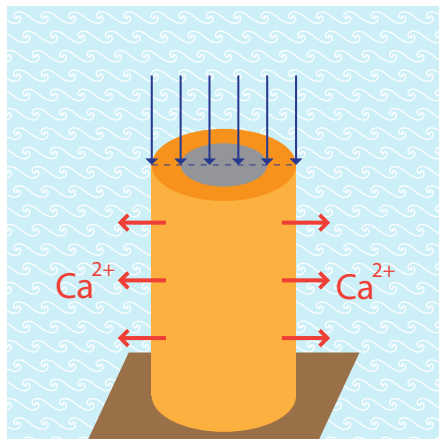
Problème couplé : lixiviation, fluage, endommagement

[Mazars 1986, Gérard 1996, Bazant et al. 1997, Mazzotti et al. 2003]



Problème couplé : lixiviation, fluage, endommagement

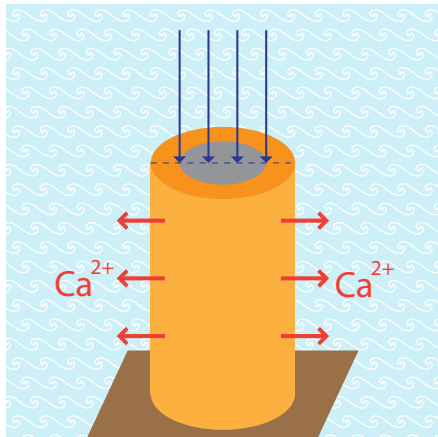
[Mazars 1986, Gérard 1996, Bazant et al. 1997, Mazzotti et al. 2003]



Variabilité		
ϕ	8 %	e.
τ	15 %	e.

Problème couplé : lixiviation, fluage, endommagement

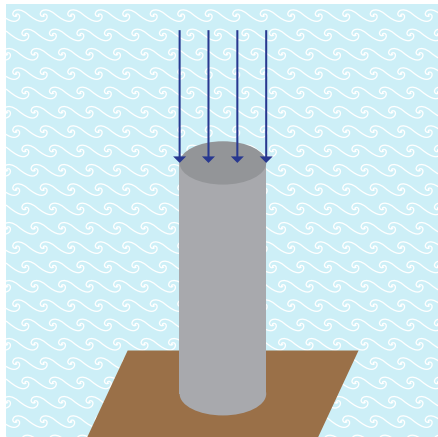
[Mazars 1986, Gérard 1996, Bazant et al. 1997, Mazzotti et al. 2003]



Variabilité		
ϕ	8 %	e.
τ	15 %	e.

Problème couplé : lixiviation, fluage, endommagement

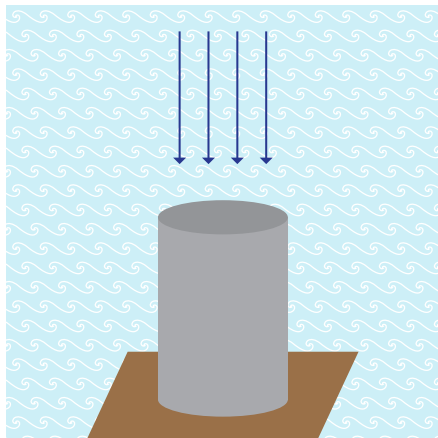
[Mazars 1986, Gérard 1996, Bazant et al. 1997, Mazzotti et al. 2003]



Variabilité		
ϕ	8 %	e.
τ	15 %	e.

Problème couplé : lixiviation, fluage, endommagement

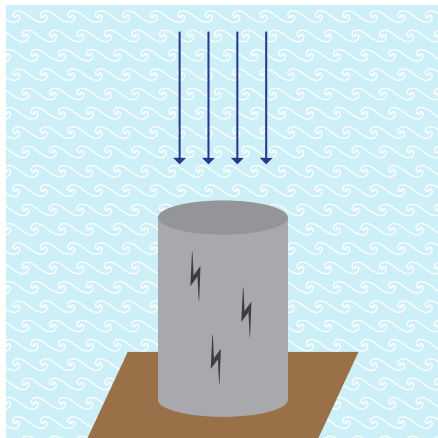
[Mazars 1986, Gérard 1996, Bazant et al. 1997, Mazzotti et al. 2003]



Variabilité		
ϕ	8 %	<i>e.</i>
τ	15 %	<i>e.</i>
E	10 %	<i>e.</i>
ν_0	25 %	<i>l.</i>
α	10 %	<i>l.</i>
k	10 %	<i>l.</i>

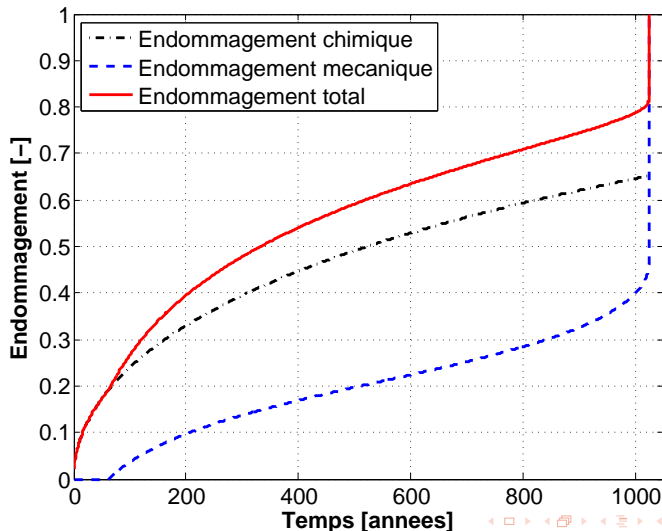
Problème couplé : lixiviation, fluage, endommagement

[Mazars 1986, Gérard 1996, Bazant et al. 1997, Mazzotti et al. 2003]



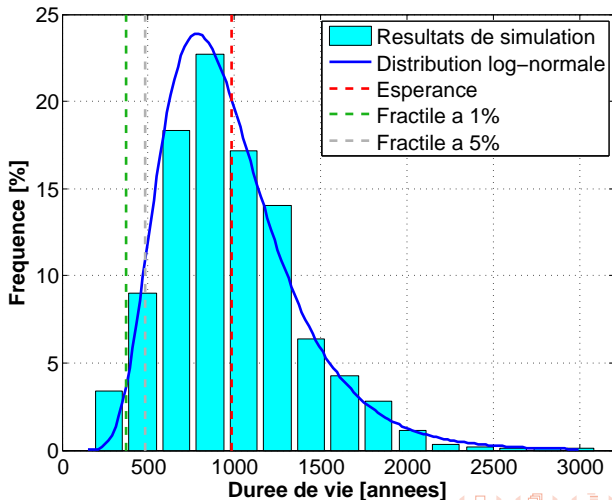
Variabilité		
ϕ	8 %	e.
τ	15 %	e.
E	10 %	e.
ν_0	25 %	l.
α	10 %	l.
k	10 %	l.
ε_D	15 %	e.
A	10 %	e.
β	20 %	l.

Simulation de l'évolution de l'endommagement



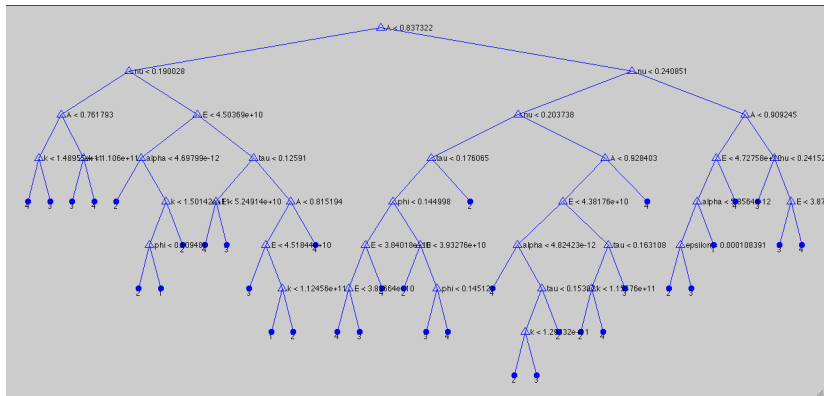
Distribution de la durée de vie

Classification des réalisations



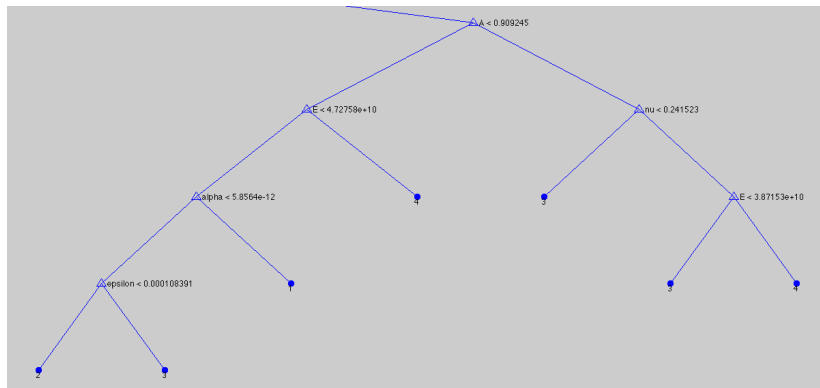
Explication des paramètres

Construction d'un arbre de décision [Breiman et al. 1984]



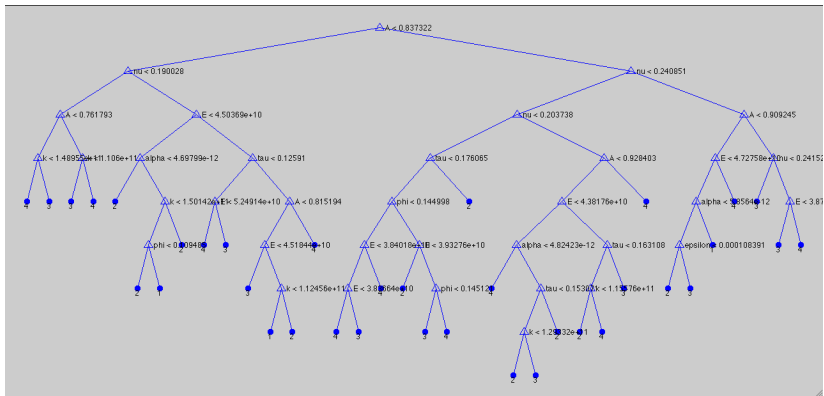
Explication des paramètres

Construction d'un arbre de décision [Breiman et al. 1984]



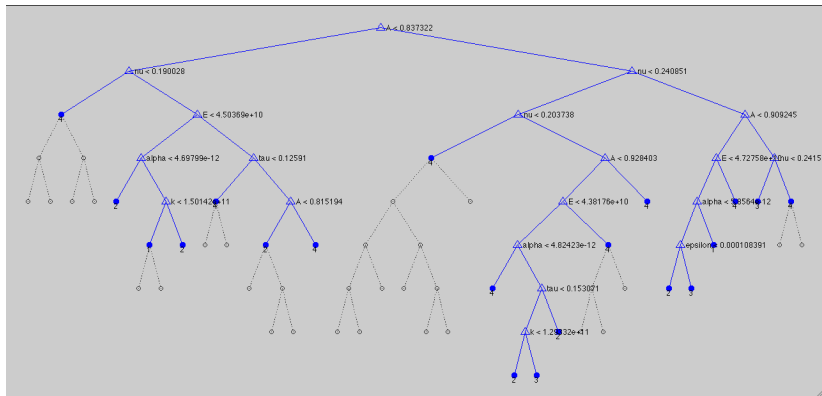
Explication des paramètres

Construction d'un arbre de décision [Breiman et al. 1984]



Explication des paramètres

Construction d'un arbre de décision [Breiman et al. 1984]

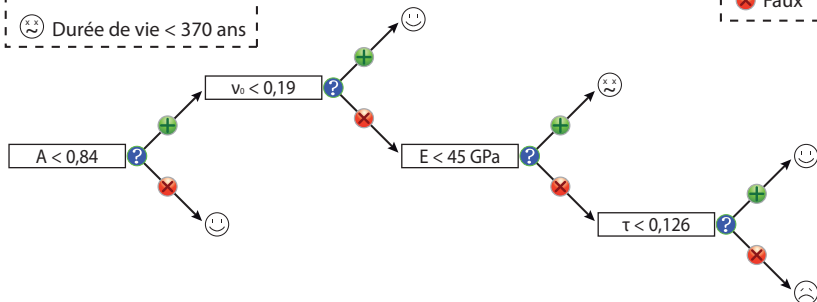


Explication des paramètres

Construction d'un arbre de décision [Breiman et al. 1984]

- 😊 Durée de vie > 482 ans
- ☹️ Durée de vie < 482 ans
- 😞 Durée de vie < 370 ans

- ⊕ Vrai
- ⊗ Faux



Conclusions

Problématique

Estimation déterministe de la durée de vie d'un ouvrage
*Quelle est l'influence de la variabilité du matériau
sur l'estimation de la durée de vie ?*

- 1 Quelle est la variabilité des grandeurs physiques ?
- 2 Quelles hypothèses sur la variabilité des paramètres ?
- 3 Quels outils pour étudier la propagation de la variabilité ?

Conclusions

Problématique

Estimation déterministe de la durée de vie d'un ouvrage
*Quelle est l'influence de la variabilité du matériau
sur l'estimation de la durée de vie ?*

- 1 **Quelle est la variabilité des grandeurs physiques ?**
 - 2 Quelles hypothèses sur la variabilité des paramètres ?
 - 3 Quels outils pour étudier la propagation de la variabilité ?
- **qualification expérimentale** des grandeurs observables
 - identification des paramètres du modèle par **analyse inverse**

Conclusions

Problématique

Estimation déterministe de la durée de vie d'un ouvrage
*Quelle est l'influence de la variabilité du matériau
sur l'estimation de la durée de vie ?*

- 1 Quelle est la variabilité des grandeurs physiques ?
 - 2 **Quelles hypothèses sur la variabilité des paramètres ?**
 - 3 Quels outils pour étudier la propagation de la variabilité ?
- absence de **corrélation** entre les grandeurs
 - modèle de **corrélation spatiale**

Conclusions

Problématique

Estimation déterministe de la durée de vie d'un ouvrage
*Quelle est l'influence de la variabilité du matériau
sur l'estimation de la durée de vie ?*

- 1 Quelle est la variabilité des grandeurs physiques ?
 - 2 Quelles hypothèses sur la variabilité des paramètres ?
 - 3 **Quels outils pour étudier la propagation de la variabilité ?**
- intégration stochastique par une **méthode directe**
 - explication des variables par un **arbre de décision**

Conclusions

Bilan critique et perspectives

- 1 Caractérisation de la variabilité des grandeurs physiques
 - Étude limitée à 2 formulations et 2 modes de fabrication
 - Nombre limité de gâchées et d'éprouvettes
- 2 Étude de la corrélation spatiale :
2 échelles de variabilité
 - variabilité au sein de la gâchée
 - variabilité entre les gâchées
- 3 Vers une modélisation "réaliste"
 - Prise en compte de conditions réelles de dégradation
 - Modélisation de problèmes couplés

Conclusions

Bilan critique et perspectives

- 1 Caractérisation de la variabilité des grandeurs physiques
 - Étude limitée à 2 **formulations** et 2 modes de **fabrication**
 - Nombre limité de **gâchées** et d'**éprouvettes**
- 2 Étude de la corrélation spatiale :
2 **échelles de variabilité**
 - variabilité au sein de la gâchée
 - variabilité entre les gâchées
- 3 Vers une modélisation "réaliste"
 - Prise en compte de **conditions réelles** de dégradation
 - Modélisation de **problèmes couplés**

Conclusions

Bilan critique et perspectives

- 1 Caractérisation de la variabilité des grandeurs physiques
 - Étude limitée à 2 **formulations** et 2 modes de **fabrication**
 - Nombre limité de **gâchées** et d'**épreuves**
- 2 Étude de la corrélation spatiale :
2 échelles de variabilité
 - variabilité au sein de la gâchée
 - variabilité entre les gâchées
- 3 Vers une modélisation "réaliste"
 - Prise en compte de **conditions réelles** de dégradation
 - Modélisation de **problèmes couplés**

Conclusions

Bilan critique et perspectives

- 1 Caractérisation de la variabilité des grandeurs physiques
 - Étude limitée à 2 **formulations** et 2 modes de **fabrication**
 - Nombre limité de **gâchées** et d'**épreuves**
- 2 Étude de la corrélation spatiale :
2 échelles de variabilité
 - variabilité au sein de la gâchée
 - variabilité entre les gâchées
- 3 Vers une modélisation "réaliste"
 - Prise en compte de **conditions réelles** de dégradation
 - Modélisation de **problèmes couplés**

Conclusions

Bilan critique et perspectives

- 1 Caractérisation de la variabilité des grandeurs physiques
 - Étude limitée à 2 **formulations** et 2 modes de **fabrication**
 - Nombre limité de **gâchées** et d'**éprouvettes**
- 2 Étude de la corrélation spatiale :
2 échelles de variabilité
 - variabilité au sein de la gâchée
 - variabilité entre les gâchées
- 3 Vers une modélisation "réaliste"
 - Prise en compte de **conditions réelles** de dégradation
 - Modélisation de **problèmes couplés**

Conclusions

Bilan critique et perspectives

- 1 Caractérisation de la variabilité des grandeurs physiques
 - Étude limitée à 2 **formulations** et 2 modes de **fabrication**
 - Nombre limité de **gâchées** et d'**épreuves**
- 2 Étude de la corrélation spatiale :
2 échelles de variabilité
 - variabilité au sein de la gâchée
 - variabilité entre les gâchées
- 3 Vers une modélisation "réaliste"
 - Prise en compte de **conditions réelles** de dégradation
 - Modélisation de **problèmes couplés**