



Évaluation de la sûreté de systèmes dynamiques hybrides complexes. Application aux systèmes hydrauliques

Groupe de travail FIMA

Perrine Broy

Université de Technologie de Troyes

20 février 2014

Évaluation de la sûreté de systèmes dynamiques hybrides complexes.

Application aux systèmes hydrauliques

Perrine Broy, 12 mars 2014

Partenaires

- LM2S (Laboratoire de Modélisation et Sûreté des Systèmes), UTT
- MRI (Management des Risques Industriels), EDF R&D

Equipe encadrante

- Directeur : Christophe Bérenguer - UTT puis INPG
- Co-Directeur (industriel) : Hassane Chraïbi - EDF R&D
- Yann Dijoux - UTT
- Roland Donat - EDF R&D

Plan de la soutenance

- 1 Objectifs
 - Contexte, enjeux, objectifs de la thèse
 - Fiabilité dynamique
- 2 Modélisation
 - Modélisation par les Automates Stochastiques Hybrides
 - Construction de la Base de Connaissances d'un réservoir simple
- 3 Exploitation des résultats
 - Indicateurs de fiabilité : classification
 - Indicateur de prise de décision : importance dynamique
- 4 Conclusion et perspectives

Plan

- 1 Objectifs
 - Contexte, enjeux, objectifs de la thèse
 - Fiabilité dynamique
- 2 Modélisation
 - Modélisation par les Automates Stochastiques Hybrides
 - Construction de la Base de Connaissances d'un réservoir simple
- 3 Exploitation des résultats
 - Indicateurs de fiabilité : classification
 - Indicateur de prise de décision : importance dynamique
- 4 Conclusion et perspectives

Hydroélectricité et évacuateurs de crues

Hydroélectricité

- 2^{ème} source de production d'électricité en 2012
- Energie propre et renouvelable
- 435 centrales hydroélectriques exploitées par EDF



Rôle des évacuateurs de crues (EdC)

- Crue ⇒ Montée des eaux incompatible avec la capacité de stockage et d'absorption du barrage
- Objectif : maintenir le plan d'eau de la retenue sous un niveau acceptable
- Structures dédiées au déversement des eaux en excédent
- EdC vannés vs. passifs

Objectifs de la thèse

EdC = SDH !

1. Evénements aléatoires discrets affectant l'ouverture des vannes
 2. Evolution physique et déterministe du niveau d'eau
- = Système Dynamique Hybride (SDH)
- + Nouvel outil : PyCATSHOO

Objectifs des travaux de thèse

1. Développer un cadre de modélisation et proposer un modèle pour les systèmes de type EdC
2. Identifier et quantifier l'intérêt de prendre en compte l'information temporelle dans des indicateurs de fiabilité

Prise en compte de l'information temporelle

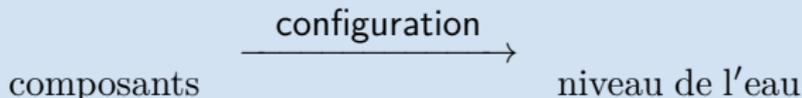
- Influence de l'instant de défaillance d'une vanne sur l'évolution du niveau
- L'occurrence de l'événement redouté est une fonction $f(T_1, \dots, T_n)$ des dates de défaillance de n composants, pas seulement une fonction des n composants en panne ou non
- Objectif : identifier la fonction f et caractériser les histoires de défaillances
- Originalité de cette démarche : considération usuelle de l'ensemble des composants en panne, ou de l'ordre des pannes
- Problématique généralisable à tous les domaines d'application de la fiabilité dynamique

Introduction à la fiabilité dynamique

Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH) et fiabilité dynamique

- Événements aléatoires discrets (configuration du système)
- Phénomènes déterministes continus et transitoires (variables environnementales)

Un exemple de double interaction : le réservoir

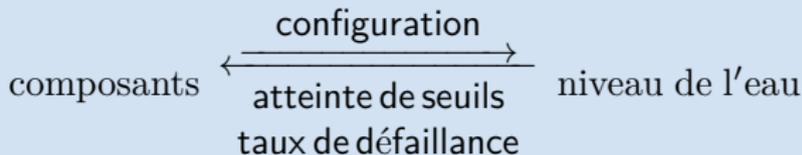


Introduction à la fiabilité dynamique

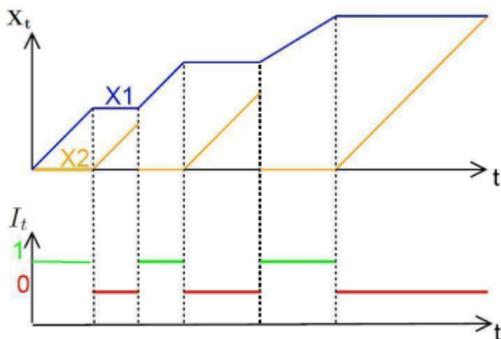
Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH) et fiabilité dynamique

- Événements aléatoires discrets (configuration du système)
- Phénomènes déterministes continus et transitoires (variables environnementales)

Un exemple de double interaction : le réservoir



Modélisation probabiliste



PDMP : Processus de Markov Déterministe par Morceaux

- (I_t) variable discrète aléatoire à valeurs dans un espace d'états fini \mathcal{E}
- (\mathbf{X}_t) vecteur déterministe continu à valeurs dans \mathbb{R}^d
- $\frac{d\mathbf{X}_t}{dt} = \mathbf{v}(i, \mathbf{X}_t)$

- Démarche en fiabilité dynamique**
1. Modélisation par les PDMP
 2. Description du système
 3. Quantification des résultats
 4. Exploitation de ces résultats

Méthodes de description

Objectif

Représenter au mieux l'évolution d'un SDH en gérant

- les équations différentielles spécifiques à la dynamique du système,
- les événements aléatoires et les distributions de probabilité associées,
- les interactions entre ces deux composantes.

Critères d'arbitrage

- Taille du système à modéliser
- Lisibilité de la représentation graphique
- Complexité des interactions
- Existence d'un outil associé

Quelques classes de méthodes

- Méthodes analytiques
- Arbres d'événements dynamiques et variantes
- Définition d'un formalisme graphique spécifique

Méthodes de quantification

Objectif

Exploiter le modèle afin de réaliser des études quantitatives

Critères d'arbitrage

- Gestion de la complexité du système
- Temps de calcul / Explosion combinatoire
- Variété des résultats obtenus
- Existence d'un outil associé

Principales classes de méthodes

- Méthodes de discrétisation
- Méthodes de simulation de Monte Carlo

Place de l'information temporelle dans les résultats de fiabilité dynamique

Résultats usuels en fiabilité dynamique

- Evolution de la fiabilité / disponibilité du système dans le temps
- Evolution de la probabilité d'occurrence de l'événement redouté dans le temps
- Evolution moyenne de la variable déterministe

Dans quelques études

- Constat : autant de trajectoires de la variable déterministe continue que d'instant de défaillance possibles
- Simulations classées par des techniques de *clustering*
- Fiabilité dynamique et mesures d'importance rarement associées

Conclusion de l'état de l'art

Choix d'une méthodologie : ASH + MC

- ASH : Automate Stochastique Hybride
- MC : Monte Carlo (simulations)

Justification

- Formalisme mathématique en accord avec celui des PDMP
- Représentation graphique intuitive et flexible
- Simulation de Monte Carlo associée
- Outil PyCATSHOO en cours de développement

Exploitation des résultats

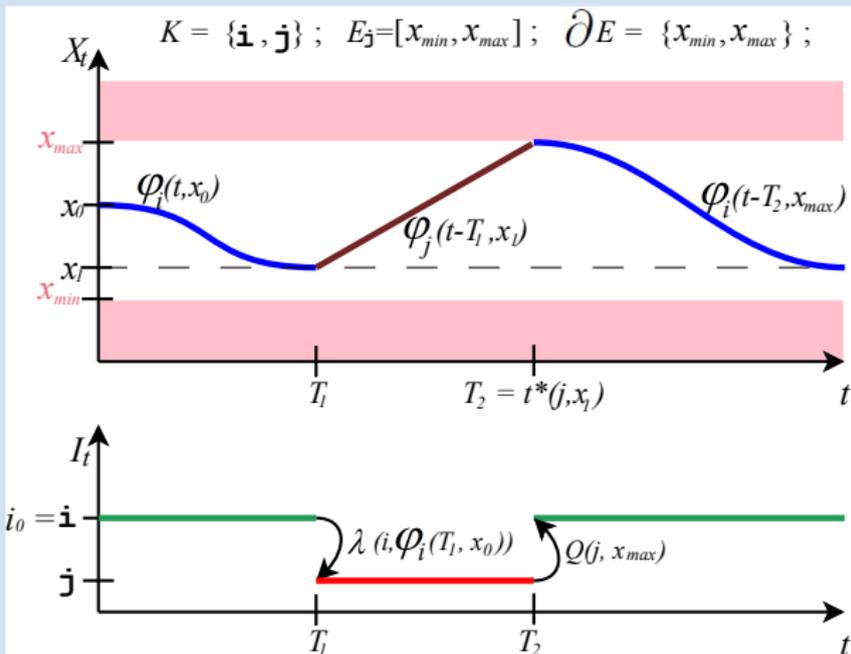
- Extraction de l'information temporelle
- Proposition d'indicateurs de sûreté de fonctionnement innovants

Plan

- 1 Objectifs
 - Contexte, enjeux, objectifs de la thèse
 - Fiabilité dynamique
- 2 Modélisation
 - Modélisation par les Automates Stochastiques Hybrides
 - Construction de la Base de Connaissances d'un réservoir simple
- 3 Exploitation des résultats
 - Indicateurs de fiabilité : classification
 - Indicateur de prise de décision : importance dynamique
- 4 Conclusion et perspectives

Définition d'un PDMP

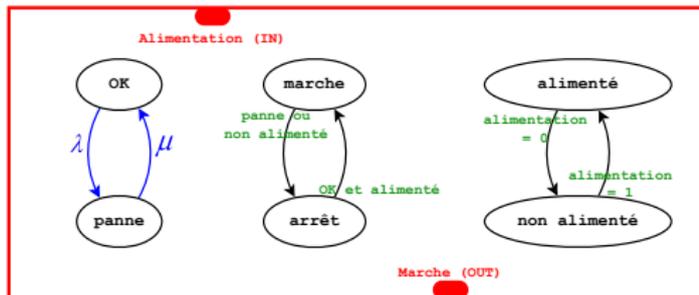
Définition de Davis (Processus de Markov Déterministe par Morceaux)



Présentation de l'outil PyCATSHOO

PyCATSHOO

- PythoniC AuTomates Stochastiques Hybrides Orientés Objets
- Trois niveaux de programmation
 1. Noyau
 2. Base de Connaissances (BdC)
 3. Modèle
 - description d'un système particulier
 - commande du suivi des résultats



Structure d'une classe PyCATSHOO

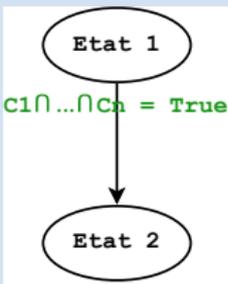
- S : ensemble d'automates stochastiques discrets ou hybrides
- RMB (Receiving Message Box) : boîtes à messages destinataires (IN)
- SMB (Sending Message Box) : boîtes à messages expéditrices (OUT)

Différents types de transition

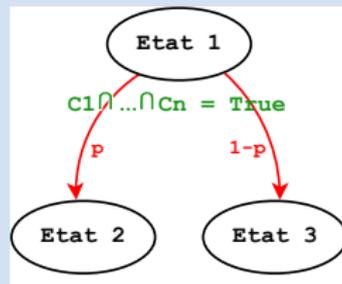
Conditions

- (C_1, \dots, C_n) : ensemble de conditions
- $C_1 \cap \dots \cap C_n$ expression booléenne

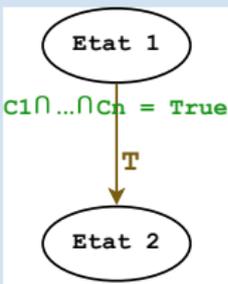
Transition instantanée déterministe



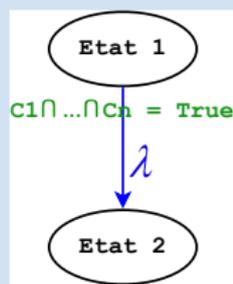
Transition instantanée stochastique



Transition retardée déterministe

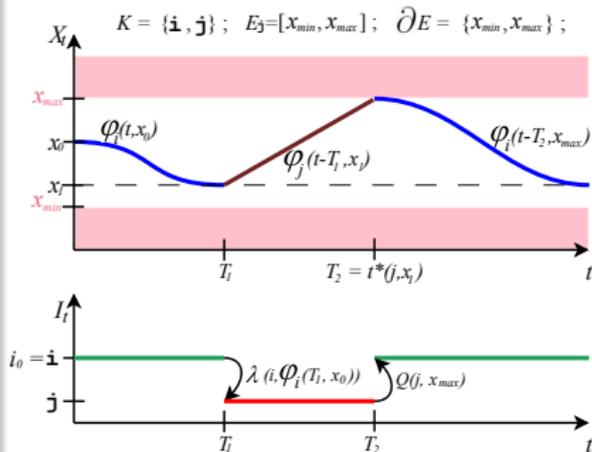


Transition retardée stochastique



Contrôle de la variable continue

- ASH hébergé dans une des classes PyCATSHOO
- Equations différentielles ($\varphi_1, \dots, \varphi_n$) à spécifier
- 3 durées à calibrer : $T_{min}, T_{max}, T_{coll}$
- T_1 : date d'une transition retardée stochastique, suivant une loi de probabilité continue
- T_2 : date du passage d'un seuil par la variable déterministe
- $T = \min(T_1, T_2, T_{max})$
- Calcul de la variable continue sur $[T_0, T_0 + T_{min}, T_0 + 2T_{min}, \dots, T]$
- Stockage de l'évolution sur $[T_0, T_0 + T_{coll}, T_0 + 2T_{coll}, \dots, T]$



Dynamique déterministe du système

$$\forall t \in [T, T + dt[,$$

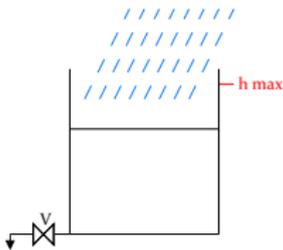
$$\frac{dh}{dt}(t) = q_{ent}(t) - \sum_v q_{sor}^{(v)}(t)$$

$$q_{sor}(t) = f(h(t)) \times ouv(t)$$

$$q_{ent}(t) = H[T] + (H[T+dt] - H[T]) \times \frac{t - T}{dt}$$

où $\{H[t_0], H[t_0 + dt], H[t_0 + 2dt], \dots\}$ est l'hydrogramme,

- t_0 est la date de début de la crue,
- dt est l'intervalle de temps entre deux points de l'hydrogramme.



⇒ Mise à jour de $q_{sor}^{(v)}$ en fonction de l'instant de défaillance de la vanne v

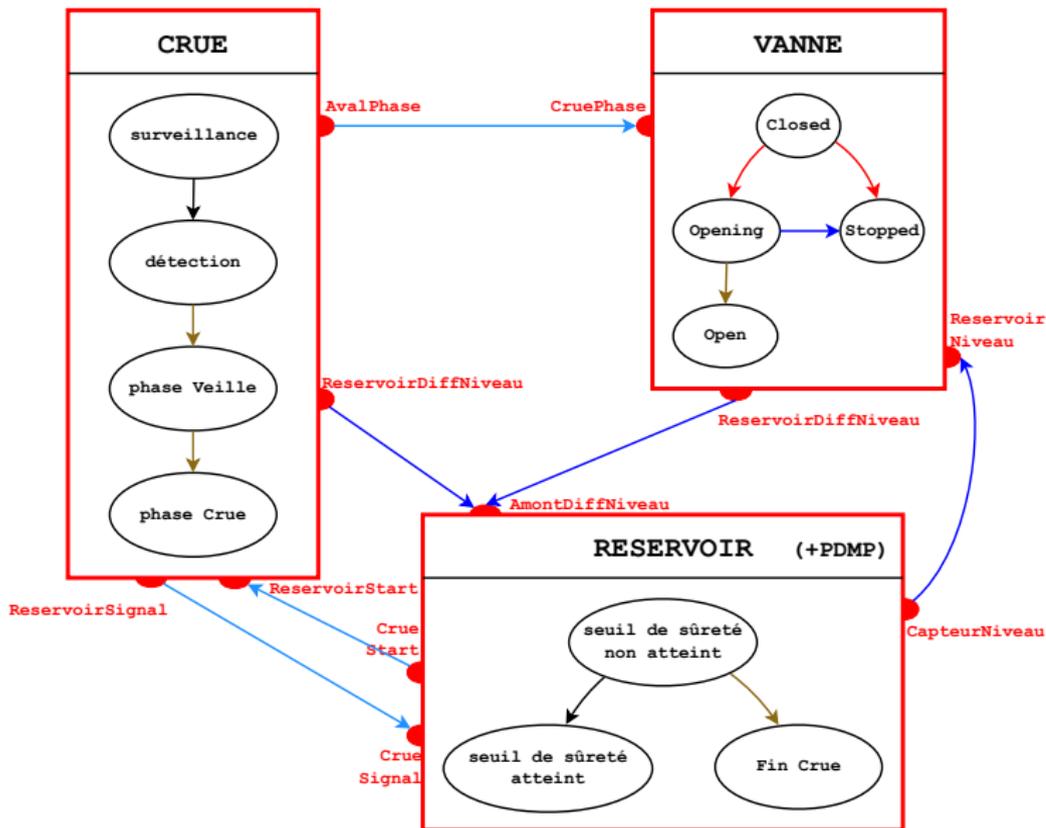
pour une vanne :

$$f(h(t))$$

$$= mL \sqrt{2g \cdot \max(0, h(t) - sb)}$$

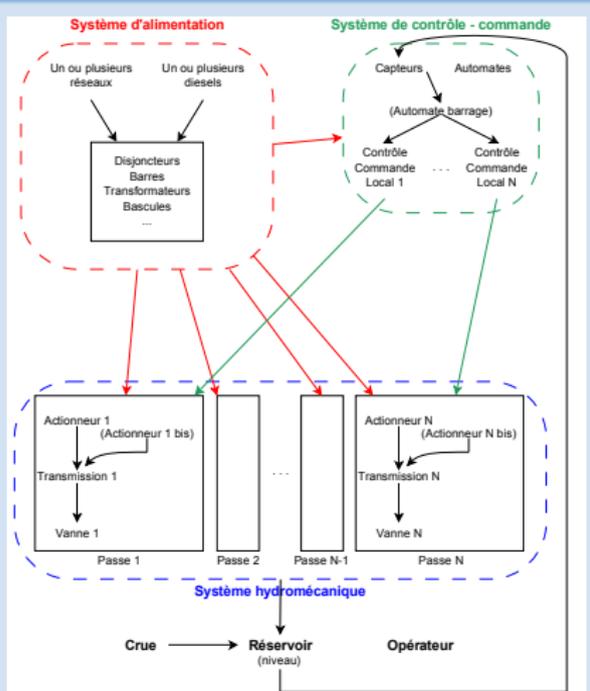
- où
- $h(t)$ est le niveau à l'instant t ,
 - $ouv(t)$ est la hauteur d'ouverture de la vanne,
 - m est un coefficient,
 - L est la largeur de la vanne,
 - g est la constante gravitationnelle,
 - sb est le seuil bas de la vanne.

Modèle global du système simple



Vers une Base de Connaissances générique

Structure globale d'un évacuateur de crues



Principales classes d'une nouvelles BdC

- Composant réparable
- Composant alimenté
- Composant manoeuvré
- Opérateur
- Crue
- Réservoir

Conclusion et perspectives pour la modélisation (2)

Démarche

1. Compréhension du fonctionnement du système
2. Description de chaque classe de composant par des automates stochastiques
3. Construction de la Base de Connaissances
4. Modèle décrivant un système particulier

Objectifs atteints

- Modélisation relevant de la fiabilité dynamique, dédiée aux Systèmes Dynamiques Hybrides
- Description d'un système de taille industrielle, dans toute sa complexité
- Pas d'explosion du nombre d'automates
- Pas de perte d'information temporelle

Perspectives : hypothèses de modélisation à lever

- Puissance requise pour activer les vannes indépendante de la pression et du niveau d'eau dans la retenue
- Objectif "laminer la crue"
- Anticipation de l'abaissement du plan d'eau avant la crue
- Vannes double-corps
- Système d'alarme

Plan

- 1 Objectifs
 - Contexte, enjeux, objectifs de la thèse
 - Fiabilité dynamique
- 2 Modélisation
 - Modélisation par les Automates Stochastiques Hybrides
 - Construction de la Base de Connaissances d'un réservoir simple
- 3 Exploitation des résultats
 - Indicateurs de fiabilité : classification
 - Indicateur de prise de décision : importance dynamique
- 4 Conclusion et perspectives

Objectifs de la quantification

Indicateurs usuels

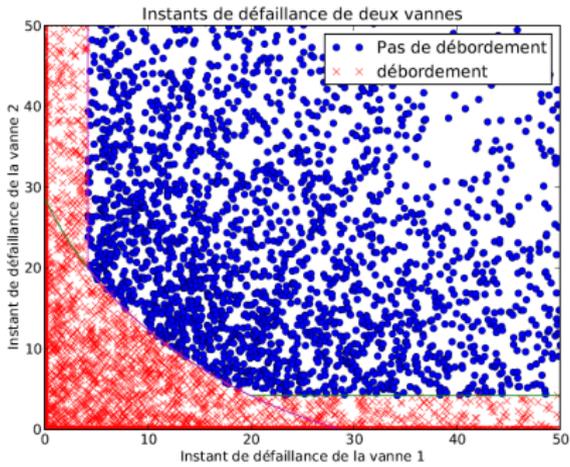
- Estimateur de la probabilité d'occurrence de l'événement redouté
- Indicateurs capables d'identifier les composants qui contribuent le plus à l'événement redouté

Classification des histoires

Modèle permettant de classer les instants de défaillance des composants en fonction de l'issue de la crue

Objectifs généraux

- Evaluation de la sûreté
- Identification des composants les plus critiques
- Priorisation des actions de maintenance



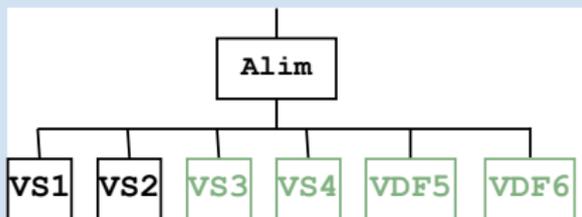
Description des systèmes Fil Rouge

Simulation de systèmes "Fil Rouge" (FR)

- Inspiré d'un évacuateur de crues réel
- $N = 350000$ simulations

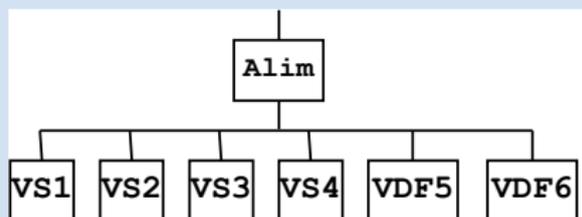
FR1 (3 composants)

- 1 alimentation
- 2 vannes de surface (VS)



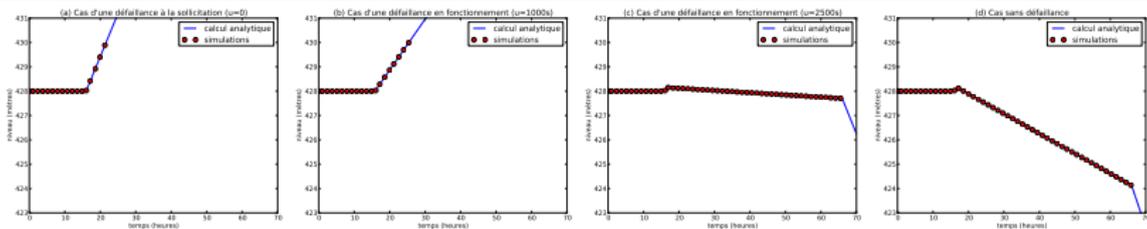
FR2 (7 composants)

- 1 alimentation
- 4 vannes de surface (VS)
- 2 vannes de demi-fond (VDF)

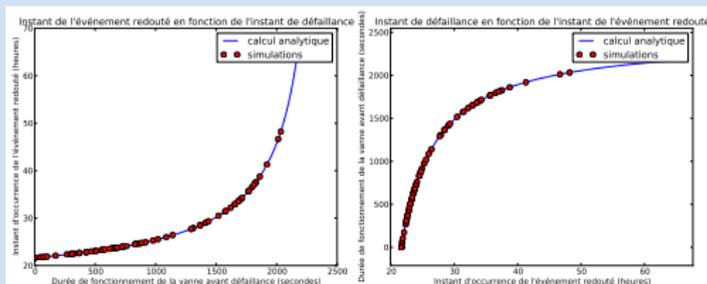


Indicateurs intermédiaires

Evolution du niveau dans le réservoir



Dépendance de l'instant de défaillance de la vanne et de l'événement redouté

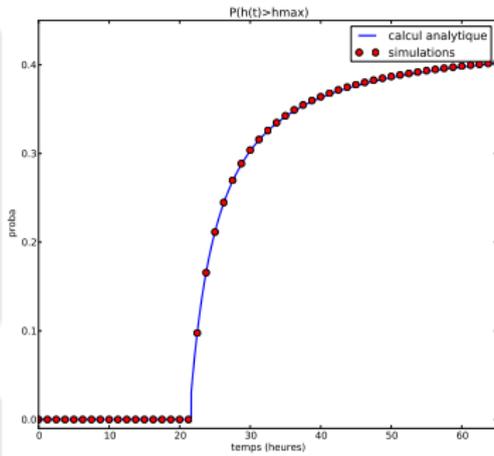


⇒ Bon accord entre calcul théorique et simulations

Évolution de la probabilité d'occurrence de l'événement redouté pour un réservoir simple

- ### Méthodologie
- Etat intéressant : SSA (seuil de sûreté atteint)
 - Probabilité d'occurrence de l'ER :
$$p_{occ}(t) = \frac{\text{nombre d'histoires pour lesquelles l'état SSA est activé avant } t}{\text{nombre d'histoires simulées}}$$
 - Etude de la convergence : $N \geq (2\alpha\sigma/l)^2 = 39000$ pour un IC de largeur $l = 10^{-2}$

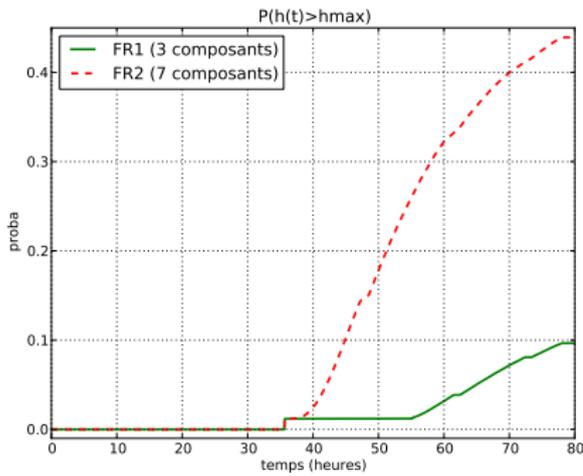
- ### Interprétation de la courbe
- Saut vertical : défaillance à la sollicitation
 - Allure : fonction exponentielle de paramètre $\lambda = 0,8$



Évolution de la probabilité d'occurrence de l'événement redouté pour les systèmes "Fil Rouge"

- Vers un système plus réaliste : étapes
1. Evolution réaliste de la variable de niveau
 2. Variété des distributions de probabilité
 3. Ajout successifs de nouveaux composants

- Interprétation des courbes
- 4,3 vannes sont nécessaires pour évacuer la crue
 - Saut vers 35 heures : défaillance de l'alimentation avant l'ouverture ou double défaillance à la sollicitation des vannes
 - Pas de saut représentant la défaillance à la sollicitation d'une seule vanne
 - Pallier : manque d'histoires
 - FR1 plus fiable que FR2 (plus de vannes parfaites)



Coupes prépondérantes

Objectif et principe

- Identifier quel composant (ou quel groupe de composants) contribue le plus à la réalisation de l'ER
- Pas de l'information sur l'ordre et la date de chaque événement
- Histoires dont l'issue est la réalisation de l'événement redouté

Définition

La coupe c_k associée à la simulation k est constituée des composants i tombés en panne pendant la simulation

Exemple : réservoir à trois vannes

- Panne de V1 et V3, bon fonctionnement de V2
- ⇒ Coupe : {V1,V3}

Regroupement en coupes équivalentes

Objectif

- Regrouper les composants par type d'objets
- Améliorer la lisibilité des résultats lorsque le système présente une structure parallèle

Définition

La coupe équivalente $c_{=}$ à la coupe c_{\neq} est l'ensemble des groupes d'objets dont au moins un est défaillant, associés au nombre d'objets défaillants dans ce groupe.

Exemple : Cas de la coupe $\{V1, V3\}$

- Coupe équivalente associée à la coupe $\{V1, V3\}$
- ⇒ $\{(2/3), V\}$
- ⇒ Signification : "perte de 2 vannes sur les 3"

Coupes prépondérantes pour les systèmes "Fil Rouge"

FR1 (Alim + 2 VS)

Événement redouté : 9,56% des histoires

1. 2 vannes / 2 : 87,42%
2. Alimentation : 12,34%
3. 1 vanne / 2 : 0,10%
4. 2 vannes / 2 + Alim : 0,07%
5. 1 vanne / 2 + Alim : 0,07%

Constat

La coupe la plus fréquente n'est pas celle qui provoque le plus d'ER.

FR2 (Alim + 4 VS + 2 VDF)

Événement redouté : 43,93% des histoires

1. 3VS/4 + 1VDF/2 : 23,09%
2. 2VS/4 + 1VDF/2 : 18,07%
3. 2VS/4 + 2VDF/2 : 14,44%
4. 3VS/4 + 2VDF/2 : 13,00%
5. 3VS/4 + 0VDF/2 : 8,83%

...

10. Alimentation : 2,67%

Définition d'une séquence

Définition

Une séquence $s = (e_1, \dots, e_N)$ est la suite chronologique des états activés lors d'une simulation :

$$\left(\left[t_{cl} \left(e_k^{A_j^{oi}} \right), c_l^{oi}, e_k^{A_j^{oi}} \right] \right)_{i \leq n_o, j \leq n_A^{oi}, k \leq n_e^{A_j^{oi}}, l \leq n_c^{oi}}$$

Notations

- $[o_1, \dots, o_{n_o}]$: liste des objets définis dans la BdC
- $[A_1^{oi}, \dots, A_{n_A}^{oi}]$: liste des automates retraçant le fonctionnement de l'objet o_i
- $[e_1^{A_j^{oi}}, \dots, e_{n_e}^{A_j^{oi}}]$: liste des états de cet automate
- $[c_1^{oi}, \dots, c_{n_c}^{oi}]$: liste des instances de l'objet o_i
- $t_{cl} \left(e_k^{A_j^{oi}} \right)$: date de l'activation de l'état $e_k^{A_j^{oi}}$ de l'automate A_j^{oi} pour l'instance c_l^{oi}

Exemple : réservoir à une seule vanne

([0, V, closed],
[0, C, surveillance],
[0, C, détection],
[3600, C, phase Veille],
[57600, C, phase Crue],
[57900, V, opening],
[60900, V, open],
[237600, R, Fin Crue]).

Définition d'une histoire

Objectifs

- Cibler certains états intéressants
- Gain de temps et de mémoire

Définition

Une histoire $h = [e_1^*, \dots, e_{N^*}^*]$ est composée de N^* triplets

$$\left(\left[t_{cl} \left(e_{k^*}^{A_j^{oi}} \right), c_l^{oi}, e_{k^*}^{A_j^{oi}} \right] \right)_{i \leq n_o, j \leq n_A^{oi}, k \leq n_e^{A_j^{oi}}, l \leq n_c^{oi}} \quad \text{tels que } e_{k^*}^{A_j^{oi}} \in \{s \cap E_*^{A_j^{oi}}\}.$$

Notations

- A_j^{oi} : automate d'un objet oi
- $[e_1^{A_j^{oi}}, \dots, e_{n_e^{A_j^{oi}}}^{A_j^{oi}}]$: liste des états de cet automate
- $e_{k^*}^{A_j^{oi}}$: état intéressant
- $E_*^{A_j^{oi}}$: liste des états intéressants.
- $s = [e_1, \dots, e_N]$: séquence composée de N triplets

$$\left(\left[t_{cl} \left(e_k^{A_j^{oi}} \right), c_l^{oi}, e_k^{A_j^{oi}} \right] \right)_{i \leq n_o, j \leq n_A^{oi}, k \leq n_e^{A_j^{oi}}, l \leq n_c^{oi}}$$

Exemple : réservoir à une seule vanne

$$E_*^R = \{\text{SSA, Fin Crue}\}$$

$$E_*^C = \emptyset$$

$$E_*^V = \{\text{opening, open, stopped}\}$$

$$([57900, V, \text{opening}],$$

$$[60900, V, \text{open}],$$

$$[237600, R, \text{Fin Crue}])$$

Définition du vecteur de durées de fonctionnement sans défaillance (VTTF)

Principe et objectif

- *Time To Failure (TTF)*
- Gain de temps et de mémoire

Définition de la durée de fonctionnement sans défaillance (TTF) du composant $c_l^{o_i}$

$$T_{c_l} = \min \left(t_{c_l}(e_{s*}^{o_i}), t_{c_l}(e_{f*}^{o_i}) \right) - t_{c_l}(e_{0*}^{o_i})$$

Définition du vecteur de durées de fonctionnement sans défaillance (VTTF) associé à une histoire simulée h

$$VTTF = \left\{ \left(\min \left(t_{c_l}(e_{s*}^{o_{\#}}), t_{c_l}(e_{f*}^{o_{\#}}) \right) - t_{c_l}(e_{0*}^{o_{\#}}) \right)_{o_{\#} \in O^{\#}, l \leq n_c^{o_{\#}}}, issue \right\}$$

Notations

- $h = [e_1^*, \dots, e_{N^*}^*]$: histoire composée de N^* triplets $\left([t_{c_l}(e_{k*}^{o_i}), c_l^{o_i}, e_{k*}^{o_i}] \right)$
- $e_{0*}^{o_i}$: état de fonctionnement de l'objet o_i
- $e_{s*}^{o_i}$: état après succès du processus
- $e_{f*}^{o_i}$: état après défaillance du processus
- $issue \in \{-1, 1\}$

Exemple

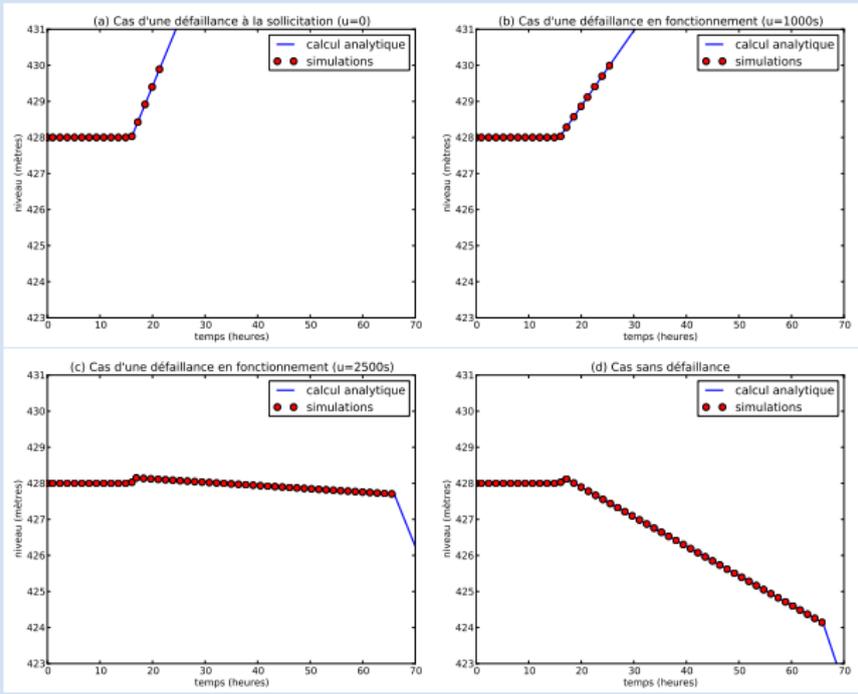
$h = ([t_{v_0}, V1, \text{opening}], [t_{v_0}, V2, \text{opening}], [t_{v_0}, V3, \text{stopped}], [t_{v_1}(\text{stopped}), V1, \text{stopped}], [t_{v_2}(\text{open}), V2, \text{open}], [t_{c_f}, R, \text{Fin Crue}])$

$$VTTF = \{[T_1, T_2, T_3], -1\}$$

1. $T_1 = t_{v_1}(\text{stopped}) - t_{v_0}$
2. $T_2 = t_{v_2}(\text{open}) - t_{v_0}$
3. $T_3 = 0$

Classification des histoires

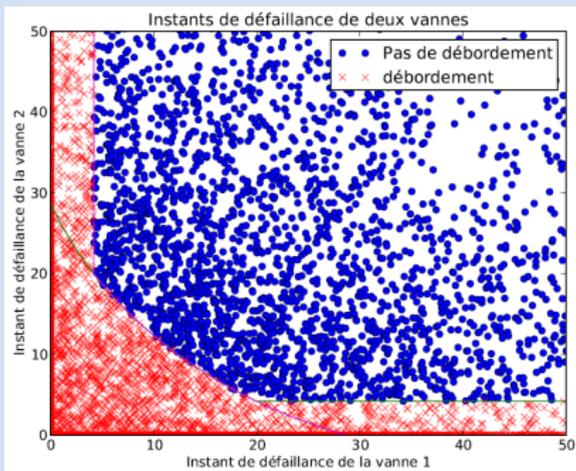
Objectif de la classification



Classification des histoires

Objectif de la classification

- Anticiper l'issue de nouvelles histoires à partir des instants de défaillances des composants (T_1, \dots, T_n)
- Caractériser la fonction $f(T_1, \dots, T_n) = s$ où s est l'issue d'une histoire



Classification des histoires

Objectif de la classification

- Anticiper l'issue de nouvelles histoires à partir des instants de défaillances des composants (T_1, \dots, T_n)
- Caractériser la fonction $f(T_1, \dots, T_n) = s$ où s est l'issue d'une histoire

Problématique : comment séparer les histoires ?

- En dimension 1 : définition d'un instant t_{sep} qui sépare les histoires en deux sous-ensembles.
Instant avant lequel la défaillance de la vanne entrainera systématiquement l'événement redouté, et après lequel le débit sortant sera suffisant pour évacuer la crue.
- En dimension 2 : infinité de couples (t_{sep}^1, t_{sep}^2) caractérisant la frontière

Calcul théorique de l'équation de la frontière dans le cas de deux vannes

$$u_2^{sep}(u_1) = (t_{cf} - t_{v0} - u_1)$$

$$+ \sqrt{(t_{cf} - t_{v0} - u_1)^2 - 2 \left\{ \frac{d_{ouv}}{q_{max}} [S(h_0 - h_{max}) + I_c(t_{cf} - t_{c0})] - u_1^2 - (t_{cf} - t_{v0})u_1 \right\}}$$

$$\Leftrightarrow S(h_0 - h_{max}) + I_c(t_{cf} - t_{c0}) + \frac{q_{max}}{2d_{ouv}} (u_1^2 + u_2^2) + \frac{q_{max}}{d_{ouv}} u_1 u_2 + \frac{q_{max}}{d_{ouv}} (t_{cf} - t_{v0}) (u_1 - u_2) = 0$$

Classification des histoires simulées

Données d'entrée

- $D = \{d_k\}_{k \leq N}$: ensemble des VTTF obtenus à partir des N simulations
- $d_k = \{v_k, i_k\}$: VTTF associé à la simulation de l'histoire k
- $v_k = [T_1^k, \dots, T_{s\#}^k]$
- $i_k \in \{-1; 1\}$: issue de simulation k

- $H^+ = \{k \leq N / i_k = 1\}$: ensemble des histoires dont l'issue est l'ER
- $H^- = \{k \leq N / i_k = -1\}$: ensemble des histoires dont l'issue est l'absence d'ER
- $V^+ = \{v_k \in d_k / d_k \in D \text{ et } i_k = 1\}$: ensemble des VTTF associés
- $V^- = \{v_k \in d_k / d_k \in D \text{ et } i_k = -1\}$: ensemble des VTTF associés

Séparateur linéaire

Machines à vecteurs support (SVM)

- SVM : *Support Vector Machine*
- Technique d'apprentissage automatique pour la classification binaire des données

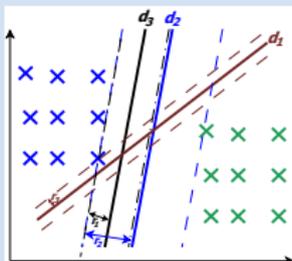
Objectif

- Résoudre l'équation de l'hyperplan linéaire $f(x) = \mathbf{w} \cdot \mathbf{x} + b = 0$
- Marge : distance du point le plus proche de l'hyperplan
- "Meilleur" séparateur = plus grande marge

Problème d'optimisation

$$\begin{cases} \min & \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 \\ \text{s.c.} & \forall i, y_i(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b) \geq 1 \end{cases}$$

Exemple illustratif



La droite d_2 sépare « mieux » ces points que les droites d_1 et d_3 , car c'est le séparateur qui a la plus grande marge r .

Vocabulaire et données d'entrée

- $S = \{(\mathbf{x}_i, y_i)\}_{1 \leq i \leq N}$: ensemble des N données disponibles
- \mathbf{x}_i : vecteur des variables continues
- $y_i \in \{-1, 1\}$: étiquette
- $S^+ = \{(\mathbf{x}, y) \in S / y = 1\}$
- $S^- = \{(\mathbf{x}, y) \in S / y = -1\}$

Multiplicateurs de Lagrange

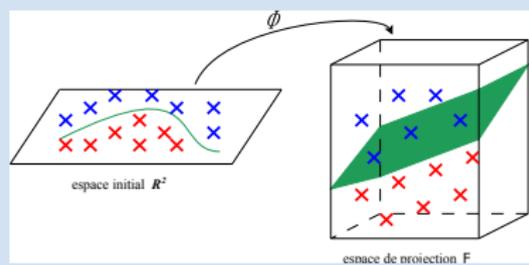
$$\begin{cases} \max & \sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j \\ \text{s.c.} & \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0 \\ & \forall i, \alpha_i \geq 0 \end{cases}$$

Solution et limites

- Fonction de décision : $f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N \alpha_i^* y_i \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x} + b$
- S est linéairement séparable si il existe \mathbf{w} et b tels que $\begin{cases} \forall (\mathbf{x}, y) \in S^+ & f(\mathbf{x}) > 0 \\ \forall (\mathbf{x}, y) \in S^- & f(\mathbf{x}) < 0 \end{cases}$

Séparateur non linéaire

Projection des données dans un espace où elles sont linéairement séparables



Solution

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N \alpha_i^* y_i \Phi(\mathbf{x}_i) \cdot \Phi(\mathbf{x}) + b$$

Problème d'optimisation dans \mathcal{F}

$$\begin{cases} \max & \sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j \Phi(\mathbf{x}_i) \cdot \Phi(\mathbf{x}_j) \\ \text{s.c.} & \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0 \\ & \forall i, 0 \leq \alpha_i \leq C. \end{cases}$$

Démarche

1. Déterminer les α_i^* solution du problème d'optimisation
2. Choisir b (algorithme avec critère d'arrêt)
3. Choisir le bon noyau k tel que $k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \Phi(\mathbf{x}) \cdot \Phi(\mathbf{y})$

Méthodologie proposée

Choix du noyau gaussien

- Forme du séparateur : $f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^P \alpha_i^* K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + b$
- Noyau gaussien : $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) = \sum_{j=1}^n \exp(-\gamma(x_{ij} - x_j)^2)$

Optimisation de la taille de l'échantillon d'apprentissage

- Précision du modèle : pourcentage de données classées avec exactitude
 $prec = \left[Card(S^+ \cap S_{svm}^+) + Card(S^- \cap S_{svm}^-) \right] \times \frac{100}{N}$
- Taux de faux négatifs TFN : pourcentage de données auxquelles le modèle a attribué une étiquette négative alors que l'étiquette réelle est positive
 $TFN = Card(S^+ \cap S_{svm}^-) \times \frac{100}{N}$
- Augmentation progressive de la taille de l'échantillon d'apprentissage jusqu'à l'obtention de critères satisfaisants

Options disponibles

Liberté sur le nombre de composants considérés par le modèle

Conclusions et perspectives

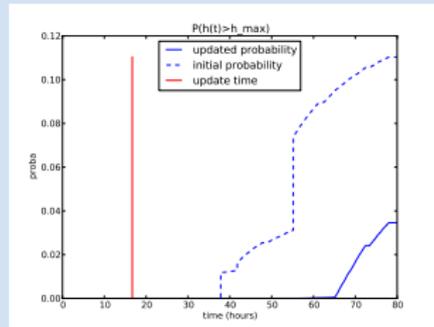
sur ces indicateurs de sûreté de fonctionnement

Indicateurs proposés

1. Probabilité d'occurrence de l'événement redouté
 - ⇒ hiérarchisation des évacuateurs de crues (EdC),
 - ⇒ hiérarchisation des risques vis-à-vis du type de crue pour un même EdC
2. Coupes prépondérantes
 - ⇒ leviers d'amélioration de la fiabilité de l'EdC
3. Classification des histoires
 - ⇒ données temporelles exploitées au maximum
 - ⇒ pronostic de l'issue de nouvelles histoires

Perspectives

- Réactualisation de ces indicateurs avec les connaissances acquises à un instant t de la crue
- Durée requise avant la défaillance pour les composants encore en fonctionnement
- Indicateurs adaptés à la gestion d'une situation d'urgence
- Prise en compte des réparations



Objectifs

Objectifs de l'estimation de l'importance dynamique

1. Mesurer la variation de la probabilité d'occurrence de l'événement redouté provoquée par la défaillance d'un composant, par rapport à une situation de référence
2. Comparer ces mesures et identifier le composant dont la défaillance a le plus d'impact sur la probabilité d'occurrence de l'événement redouté
3. Identifier le composant le plus important dans un Système Dynamique Hybride, à tout instant de son fonctionnement
4. Répéter cette démarche pour un groupe de composants

Définition de l'importance dynamique de Birnbaum

Notations et vocabulaire

- ER : réalisation d'un événement redouté
- eb_i : réalisation d'un événement de base, lié à la défaillance du composant i
- T_i : date de la défaillance du composant i
- $\bar{\omega}$: complémentaire de l'événement ω
- **Temps de mission du composant** c : période pendant laquelle le composant c peut tomber en panne
- **Situation normale** : déroulement du processus de crue sans modification des paramètres de fiabilité

Définition de l'indicateur d'importance de Birnbaum

- Version statique

$$I_B(eb_i) = P(ER/eb_i) - P(ER/\bar{eb}_i)$$

- Version dynamique

$$I_i(t) = P(ER/T_i \leq t) - P(ER/T_i > t)$$

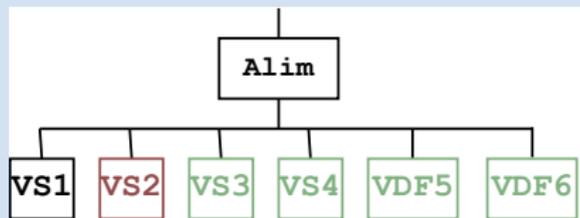
Généralisation

- Possibilité de définir les versions dynamiques d'autres facteurs d'importance

Système étudié et calcul théorique (1)

Système étudié

- 1 alimentation + 1 vanne
- Rôle de l'alimentation électrique :
 - fournir de l'énergie à la vanne pour son ouverture ;
 - fonctionnement requis dès le début de la crue jusque la fin de l'ouverture
- Rôle de la vanne :
 - évacuer un volume d'eau suffisant pour éviter l'événement redouté ;
 - fonctionnement requis dès le signal de sollicitation jusque l'ouverture totale



Système étudié et calcul théorique (2)

Rappel : définition de t_{sep}

- instant qui sépare les histoires en deux sous-ensembles
- instant avant lequel la défaillance de la vanne entrainera systématiquement l'événement redouté, et après lequel le débit sortant sera suffisant pour évacuer la crue
- 2 composants, mais un unique t_{sep}

Calcul théorique de l'importance dynamique pour l'alimentation

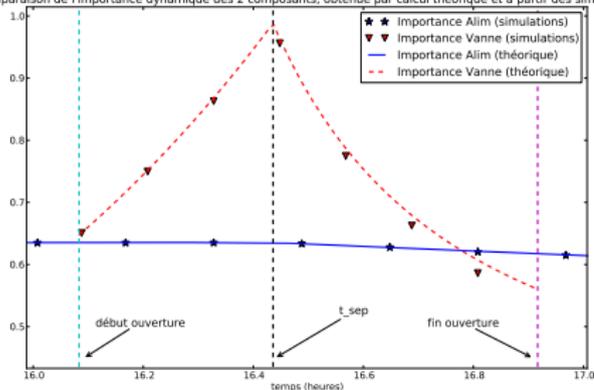
$$I_{alim}(t) = \begin{cases} (1 - \gamma_V) e^{-\lambda_V(t_{sep} - t_{ouv})} \exp(-\lambda_{alim}(t_{sep} - t)) & \text{si } t \leq t_{sep} \\ \frac{(1 - \gamma_V) e^{-\lambda_V(t_{sep} - t_{ouv})} [1 - e^{-\lambda_{alim} t_{sep}}]}{1 - e^{-\lambda_{alim} t}} & \text{si } t > t_{sep} \end{cases}$$

Calcul théorique de l'importance dynamique pour la vanne

$$I_V(t) = \begin{cases} e^{-\lambda_{alim} t_{sep}} \exp(-\lambda_V(t_{sep} - t)) & \text{si } t \leq t_{sep} \\ \frac{[1 + \gamma_V - (1 - \gamma_V) e^{\lambda_V(t_{sep} - t_{ouv})}] e^{-\lambda_{alim} t_{sep}}}{\gamma_V + (1 - \gamma_V) (1 - e^{\lambda_V(t - t_{ouv})})} & \text{si } t > t_{sep} \end{cases}$$

Comparaison et interprétation des résultats

Comparaison de l'importance dynamique des 2 composants, obtenue par calcul théorique et à partir des simulations



Début de la mission du composant

$$I_c(t_{deb}) = P(ER/def_c) - P(ER)$$

$I_c(t_{deb})$ mesure l'augmentation de la probabilité d'occurrence de l'ER que représente une défaillance à la sollicitation systématique du composant c par rapport à la situation normale.

Allure générale de la courbe

Forme de l'importance dynamique d'un composant c :

$$I_c(t) = \begin{cases} \alpha_1^c \exp(\lambda_c t) & \text{si } t \leq t_{sep} \\ \frac{\alpha_2^c}{\beta_2^c - \gamma_2^c e^{-\lambda_c t}} & \text{si } t > t_{sep} \end{cases}$$

Fin de la mission du composant

$$I_c(t_{fin}) = P(ER) - P(ER/non\ def_c)$$

$I_c(t_{fin})$ mesure la diminution de la probabilité d'occurrence de l'événement redouté que représente un remplacement du composant c par un composant parfait par rapport à la situation normale.

Confrontation avec des indicateurs usuels

Confrontation avec l'importance statique

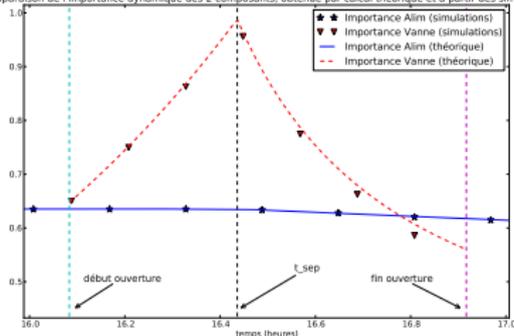
$$I_c = I_c(t_{deb}) + I_c(t_{fin})$$

Confrontation avec les coupes prépondérantes

1. Défaillance vanne : 96.79% des événements redoutés
2. Défaillance alimentation : 3,08% des événements redoutés

⇒ Alimentation importante mais fiable

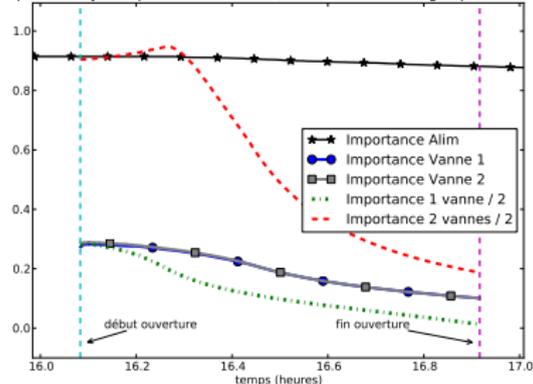
Comparaison de l'importance dynamique des 2 composants, obtenue par calcul théorique et à partir des simulations



Application aux systèmes "Fil Rouge"

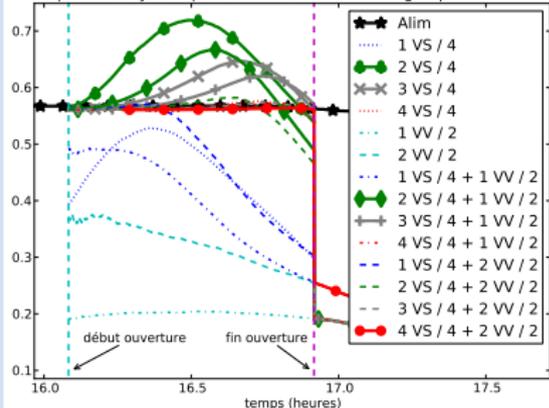
FR1 (3 composants)

Importance dynamique de l'alimentation, des 2 vannes et des groupes de vannes



FR2 (7 composants)

Importance dynamique de l'alimentation et des groupes de vannes



Conclusion sur l'importance dynamique

- Identification du composant ayant le plus d'impact sur la probabilité d'occurrence de l'ER, par rapport à une situation normale
- Définition généralisable à un groupe de composants
- Importance statique retrouvée à partir d'un calcul simple
- Lecture graphique de l'instant t_{sep}
- Exploitation de l'information temporelle

Plan

- 1 Objectifs
 - Contexte, enjeux, objectifs de la thèse
 - Fiabilité dynamique
- 2 Modélisation
 - Modélisation par les Automates Stochastiques Hybrides
 - Construction de la Base de Connaissances d'un réservoir simple
- 3 Exploitation des résultats
 - Indicateurs de fiabilité : classification
 - Indicateur de prise de décision : importance dynamique
- 4 Conclusion et perspectives

Conclusion (1)

Travail réalisé

- Etat de l'art de la fiabilité dynamique
- Identification et utilisation de méthodes et d'*outils*
 - Processus Markoviens Déterministes par Morceaux (PDMP)
 - Automates Stochastiques Hybrides (ASH)
 - Simulations de Monte Carlo
 - *PyCATSHOO*
 - Machines à Vecteurs Support (SVM)
 - Mesures d'importance
- Modélisation d'une classe de systèmes industriels
- Elaboration d'une Base de Connaissances
- Formalisation et exploitation des résultats
 - Probabilité d'occurrence de l'événement redouté
 - Coupes (regroupées ou non) prépondérantes
 - Classification des histoires
 - Importance dynamique

Conclusion (2)

Automates Stochastiques Hybrides

- Lisibilité de la représentation graphique
 - Complexité des interactions
 - Existence d'un outil
 - Pas d'explosion du nombre d'automates
- ⇒ Modélisation de systèmes de grande taille

Exploitation de l'information temporelle

- Démarche prévisionnelle fondée sur la classification des histoires
- Identification à tout moment du composant dont la défaillance à cet instant précis aurait le plus d'impact sur la probabilité d'occurrence de l'événement redouté

Applicabilité

- Les évacuateurs de crues : un support illustratif
- Méthodologie applicable à tous les domaines d'application de la fiabilité dynamique

Perspectives

Amélioration des outils numériques

- Accélération de la simulation de Monte Carlo
- Optimisation du nombre de messages échangés entre les classes de PyCATSHOO
- Parallélisation des calculs pour le traitement des résultats

Amélioration de la modélisation

- Abaissement du plan d'eau
- Contrainte "laminer la crue"
- Fermeture des vannes

Exploitation des résultats

- Regroupements des composants
- Réparation des composants
- Systèmes non cohérents
- Aide à la décision rapide et efficace

PyCATSHOO dans un futur proche

- Portage en C++
- Développement d'une IHM
- Application au dispositif d'évacuation de puissance résiduelle d'un réacteur à neutrons

Questions ?



Christiane Coccozza-Thivent.

Processus stochastiques et fiabilité des systèmes, volume 28.
Springer, 1997.



MHA Davis.

Markov models and optimization, volume 49 of *Monographs on Statistics and Applied Probability*.
Chapman & Hall, London, 1993.



A Agung Julius.

Approximate abstraction of stochastic hybrid automata.
Hybrid Systems : Computation and Control, pages 318–332, 2006.



Stefan Strubbe and Arjan van der Schaft.

Communicating piecewise deterministic Markov processes.
Stochastic Hybrid Systems, pages 65–104, 2006.