

Quelques méthodes d'analyse, de diagnostic et de pronostic utilisées en fiabilité et maintenance industrielle.

André Lannoy

Leïla Marle

IMdR, 23 06 2011, www.imdr.eu

Some methods of analysis, diagnosis and prognosis, used in reliability and industrial maintenance.

After having recalled the different issues related to industrial maintenance stakes and having defined the different types of maintenance, the presentation shows the benefits of a preventive maintenance strategy of SSC (system-structure-component) for maintaining the safety level and reducing downtime and maintenance costs. It turns out that the feedback analysis of failures and degradations, of monitoring and inspection data are essential. Indeed, this analysis will allow at first to diagnose the state of the SSC, and then to make a prognosis on the future behavior of the SSC. The presentation will show some of the methods used at present to solve this problem. The latter are mainly based on available knowledge from experience feedback (historical data, measured data), expertise and reliability or physical behavior models. Finally, it should be noted that these methods are subject to many R & D work.

Résumé

Après avoir rappelé les différents enjeux liés à la maintenance industrielle et avoir défini les différents types de maintenance, on montre l'intérêt d'une stratégie de maintenance préventive des SSC (systèmes-structures-composants) afin de maintenir le niveau de sûreté et de réduire l'indisponibilité et les coûts de maintenance. Il s'avère que l'analyse du retour d'expérience des défaillances et des dégradations, des données de surveillance et d'inspection, est essentielle. En effet, cette analyse va permettre dans un premier temps d'émettre un diagnostic sur l'état du SSC, puis de faire un pronostic sur le comportement futur de ce SSC. L'exposé présentera quelques-unes des méthodes utilisées à l'heure actuelle pour résoudre ce problème. Ces dernières s'appuient principalement sur les connaissances disponibles issues du retour d'expérience (données historiques, données mesurées), de l'expertise et de modèles de comportement fiabiliste ou physique. Il convient enfin de préciser que ces méthodes font l'objet de nombreux travaux de R&D.

Plan

- 1 Le contexte de la maintenance industrielle
- 2 L'optimisation de la maintenance
- 3 Le diagnostic

Définition

Méthodes

- 4 Le pronostic

Définition

Méthodes fiabilistes

Méthodes d'anticipation

- 5 Conclusions et perspectives
- 6 Pour en savoir plus ...

1 Le contexte de la maintenance industrielle

- Maintenir voire améliorer les objectifs de sécurité-sûreté
- Réduire l'indisponibilité (fortuite ou programmée)
- Réduire les coûts
- Optimiser les interventions (fréquence, durée, groupement, ...)

Un contexte particulier...

la prolongation de la durée d'exploitation

- Détection du vieillissement
- Estimation de la durabilité
- Détermination des actions de maintenance à mettre en place (de « ne rien faire » à la reconception)
- Modélisation technico-économique (*asset management*)

Un objectif ... optimiser la maintenance préventive

par:

- l'analyse des défaillances et dégradations,
- un diagnostic de maintenance,
- un pronostic, c.à.d. la prévision d'une durée de vie résiduelle

Qu'est-ce que la maintenance?

Ensemble de toutes les activités techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir et à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise (EN 13306, 2001).

- Des situations: retour d'expérience, mesures, échéancier, ...
- Des méthodes, des procédures, ...
- Des opérations de maintenance: visite, inspection, rénovation, ...

Types et stratégies de maintenance

- [Définitions extraites de la norme EN13306 (2001)]
- **Défaillance**: cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir sa fonction requise – *perte de fonction, “tout ou rien”, vieillissement fiabiliste*
- **Maintenance corrective**: maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise – *“run to failure” - remise en état de bon fonctionnement, aspect technologique - SLI, réactivité,*

Types et stratégies de maintenance

- [Définitions extraites de la norme EN13306 (2001)]
 - **Dégradation**: évolution irréversible d'une ou plusieurs caractéristiques d'un bien liée au temps, à la durée d'utilisation ou à une cause externe – *altération de fonction, phénomène continu, vieillissement physique*
 - **Maintenance préventive**: maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien – *éviter la perte de fonction, notion probabiliste, anticipation, prévision*

Les différentes MP

- Des objectifs de sûreté-sécurité et des objectifs de performances industrielles (SdF, économiques, logistiques (localisation, disponibilité du soutien, groupement d'actions de maintenance)),
- **Maintenance systématique**
- **Maintenance conditionnelle**: maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de fonctionnement intégrant les actions qui en découlent – *surveillance*, « *health monitoring* »
- **Maintenance prévisionnelle**: maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation d'un bien – *surveillance + prévision extrapolée, dite aussi « proactive »*

Les objectifs de la maintenance prévisionnelle

Les objectifs de la maintenance prévisionnelle sont donc:

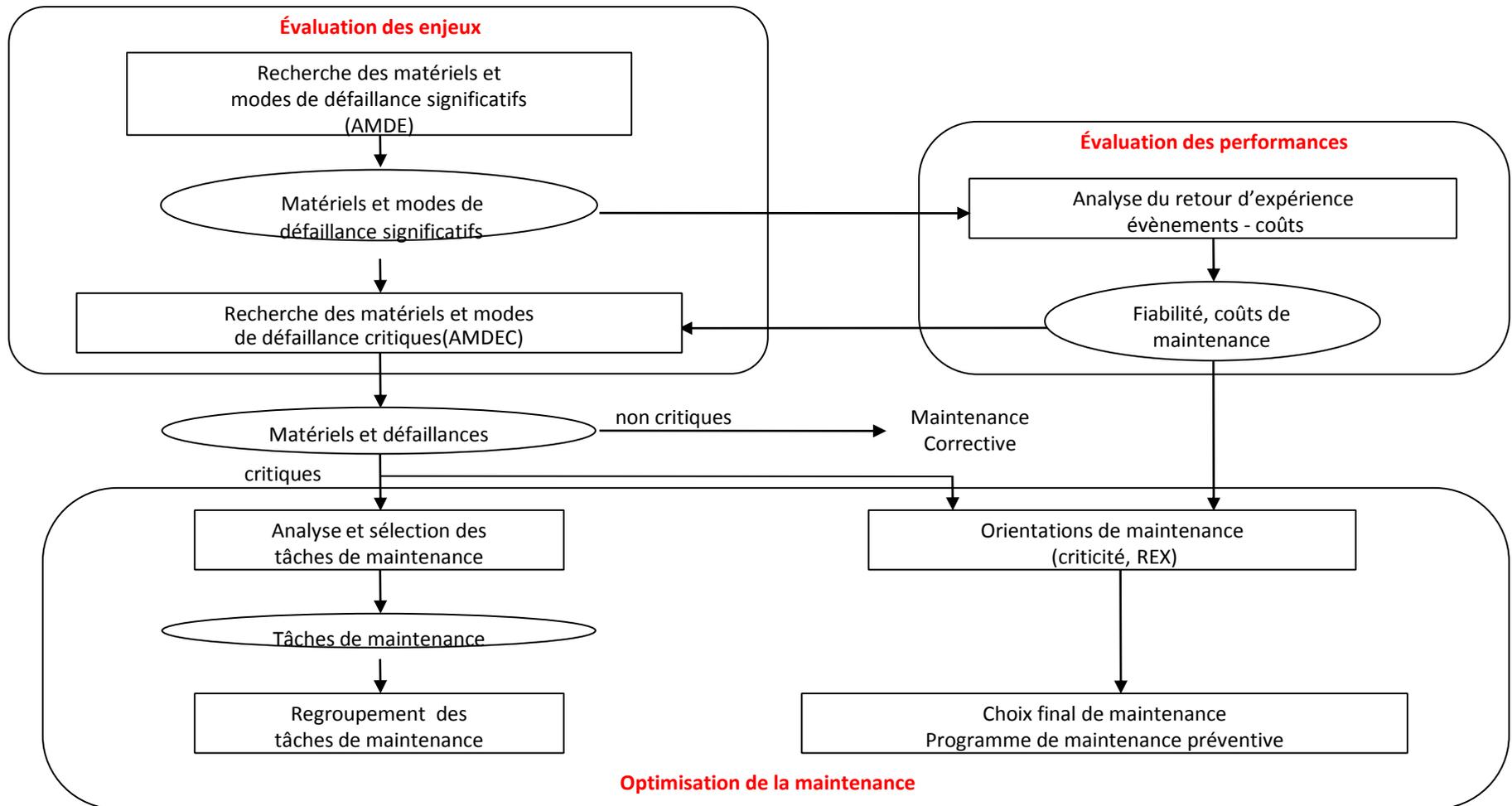
- d'assurer la fonction future du SSC,
- de réduire la probabilité de défaillance du SSC,
- et donc d'anticiper au mieux l'opération de maintenance (généralement lourde et coûteuse) à réaliser,
- après avoir vérifié l'état de fonctionnement et de dégradation du SSC à partir de données mesurées, de retour d'expérience et d'expertise et avoir établi un diagnostic de cet état.

Quelques autres définitions

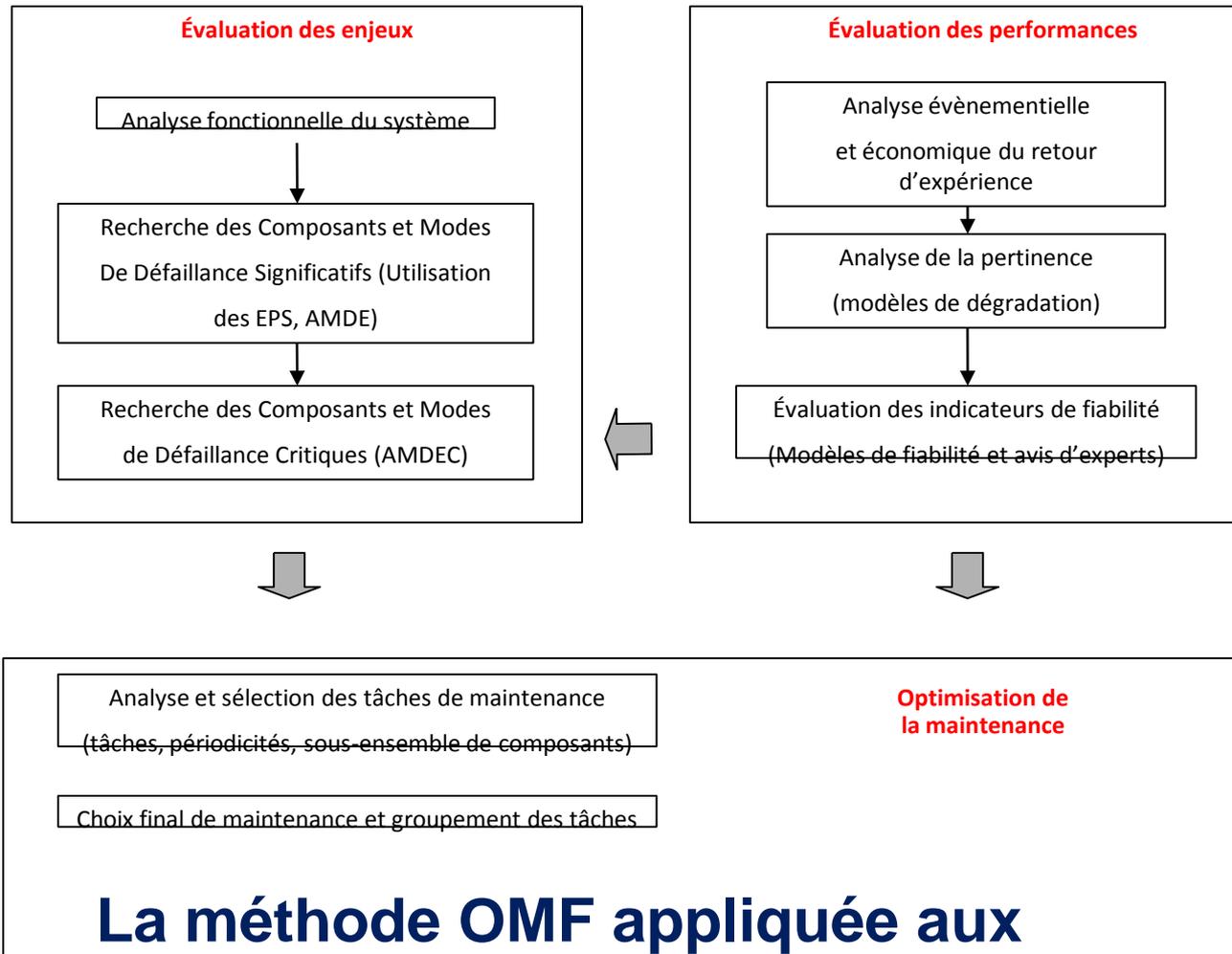
- **Anticipation:** identification, avant qu'ils ne se produisent, des événements potentiellement pénalisants en termes de sûreté, disponibilité ou de coûts (Marle, 2002)
- **Mécanisme de dégradation:** *specific process that gradually changes characteristics of an SSC with time or use* (EPRI, 1993)
- **Vieillessement:** *general process in which characteristics of an SSC gradually change with time or use*

2 La démarche OMF

Une démarche « *risk informed* »
d'optimisation de la maintenance par la fiabilité



la méthode OMF appliquée aux composants actifs



La méthode OMF appliquée aux composants passifs (structures, tuyauteries, ...)

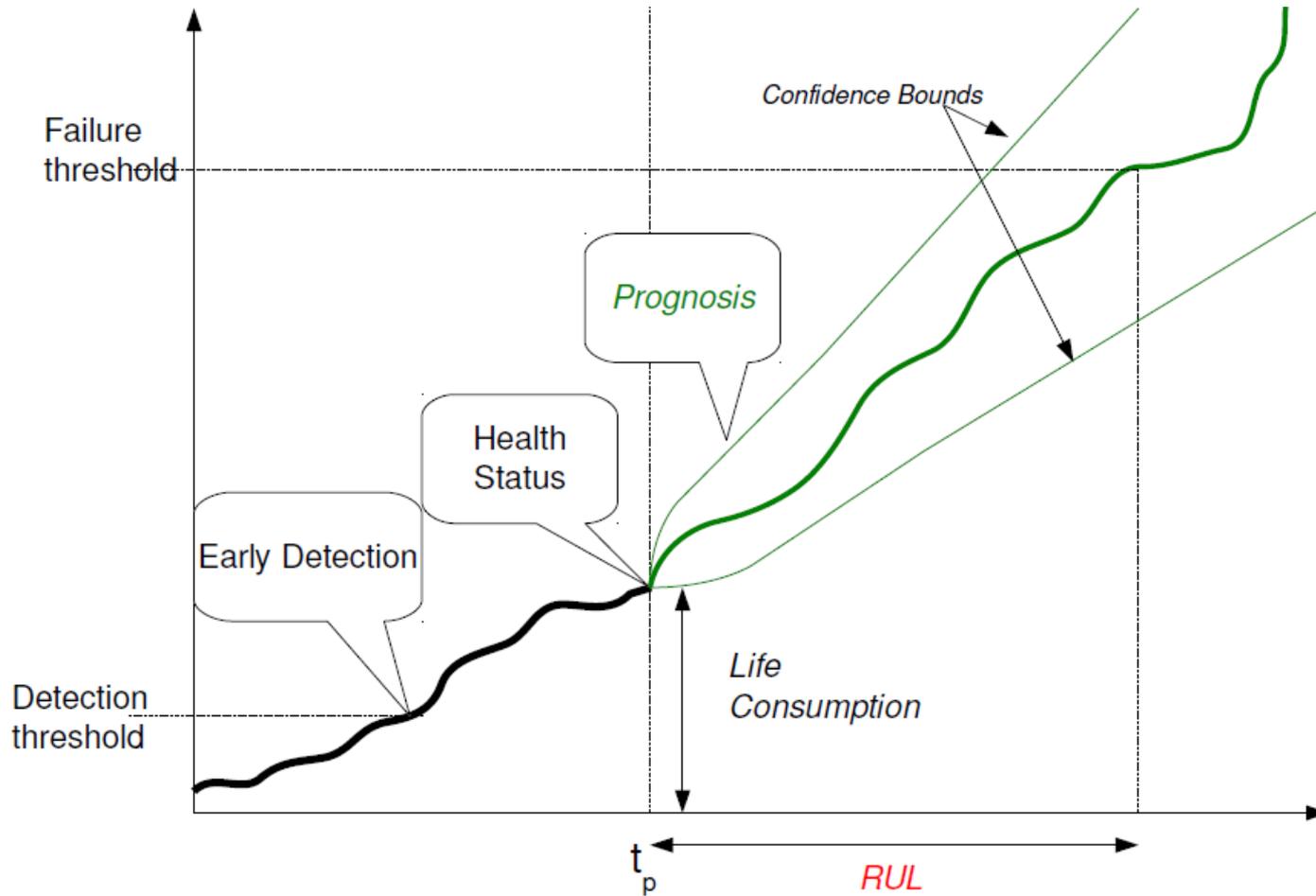
Les difficultés rencontrées

- Les conditions futures d'exploitation – environnement – maintenance sont-elles à l'image du passé?
- Apparition d'un nouveau mécanisme de dégradation?
- Quelle efficacité pour les parades?
- Détection d'un vieillissement?
- D'où la nécessité de **réactualiser** régulièrement l'OMF

L'évolution de la maintenance

- **PBMP** , 1980, rédaction des programmes de base
- **OMF**, 1989, optimisation de la MP
- **Maintenance conditionnelle**: surveillance des SSC critiques (essor à la fin des années 1990)
- **LCM**, 2000, extension de la durée de vie, maintenance exceptionnelle.
- **AM**, *asset management*, 2003, valorisation technico-économique de la gestion des actifs
- **AP-913**, 2007, amélioration continue de la fiabilité, anticipation, ajustement permanent de la maintenance, organisation de la maintenance

L'évolution de la dégradation (Lorton et al, 2011)



Les problèmes

- La détection
- La fiabilité et les performances des capteurs
- Le facteur d'usage et le diagnostic (*health status*)
- L'évolution de la dégradation
- La connaissance des conditions de service futures
- L'efficacité de la maintenance
- L'**extrapolation** – prédiction – prévision
- La confiance dans l'expertise
- Les incertitudes
- Le seuil acceptable

3 Analyse du retour d'expérience et diagnostic

- Le diagnostic est au moins le résultat – synthèse de l' **analyse du retour d'expérience** des défaillances et des dégradations; il analyse la stratégie existante de maintenance.
- **Diagnostic** de panne: actions menées pour la détection de la panne, sa localisation et l'identification de la cause (EN 13306, 2001)
- ***Diagnosis:** examination and evaluation of data to determine either the condition of an SSC or the causes of the condition (EPRI, 1993)*
- A partir de ce diagnostic, on pourra tenter de pronostiquer le comportement futur.

Les méthodes de diagnostic

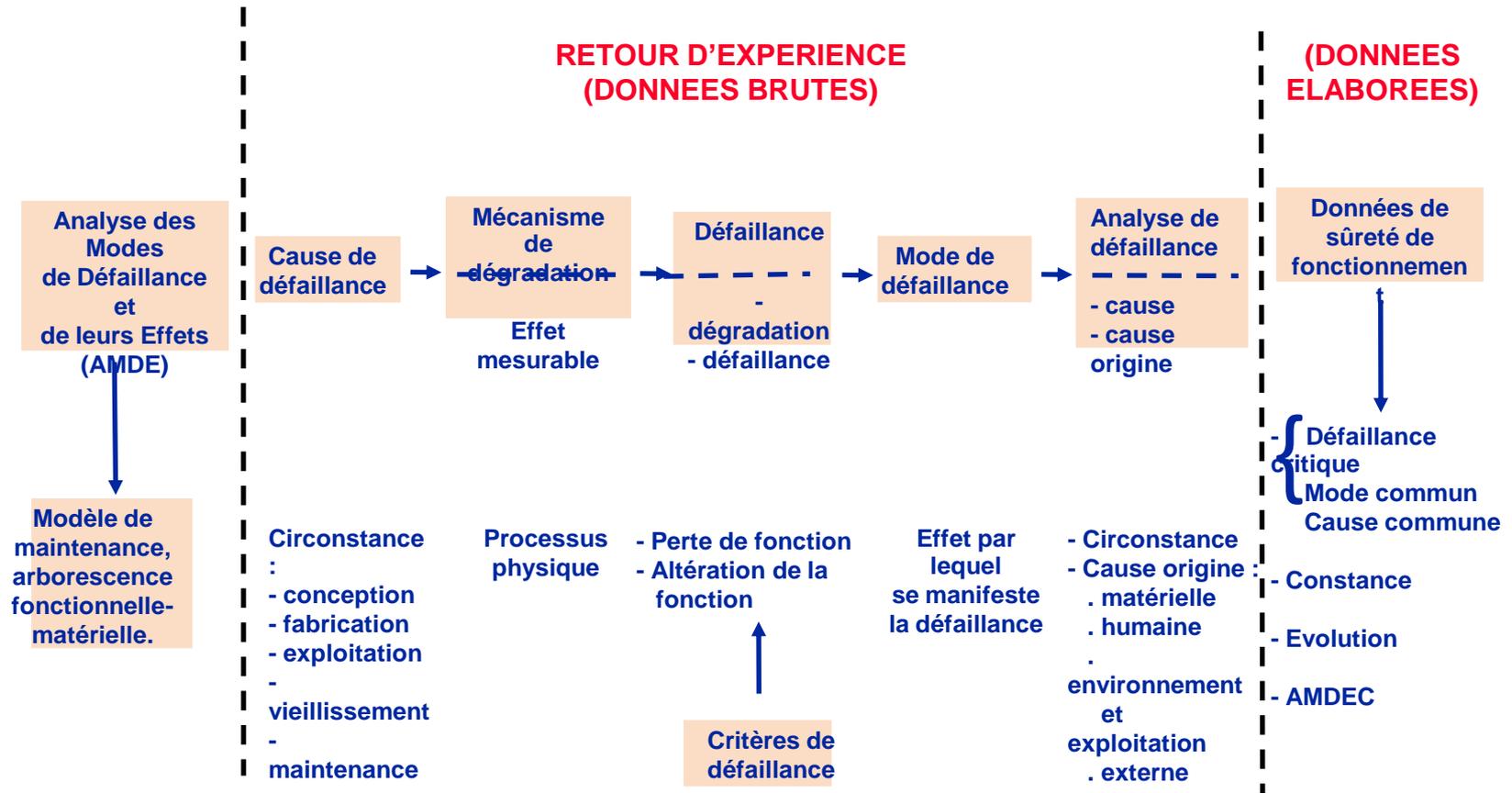
(panorama non exhaustif)

Elles dépendent de la connaissance du SSC:

- *les connaissances*: AMDE- AMDEC, AdD, systèmes experts,...
- *les données de retour d'expérience*: **analyse logique de la défaillance / dégradation**, identification des causes, évaluation des conséquences, ...
- *le retour d'expérience et l'expertise disponibles* : **variables importantes**, classes de problèmes, état du SSC, **actions** à mettre en œuvre et efficacité,...
- *les modèles physiques* : comparaison calcul/observation et détection des incohérences

L'analyse des défaillances / dégradations

- Le retour d'expérience de la maintenance couvre les besoins de SdF et de sécurité – sûreté.
- Le modèle de maintenance (l'arborescence fonctionnelle – matérielle) définit le retour d'expérience à suivre.
- Le retour d'expérience donne une vision rétrospective; il est nécessaire mais ne suffit pas pour une vision prospective.



Schématisation du processus de retour d'expérience

Quelques méthodes utilisées pour établir un diagnostic

- **Schémas techniques et fonctionnels**
- **AMDE - AMDEC**
- **Tableaux:** effets → causes → actions de maintenance
- **Tests de diagnostic:** comparaison des réponses d'un SSC soumis à une sollicitation à des réponses de référence (bancs de test, tests intégrés, télédiagnostic)
- **Analyse causale**
- **Systemes experts:** à partir de faits observés (base de faits), gestion des règles de connaissances suivant des métarègles (si, et, ou, alors, arbitrages, priorités) puis proposition d'une action de maintenance
- **Réseaux bayésiens**

Diagnostic à partir du retour d'expérience et d'expertise – Exemple: rôle fonctionnel du joint 1 d'une pompe primaire 900 MW (Corset, 2003, 2006)

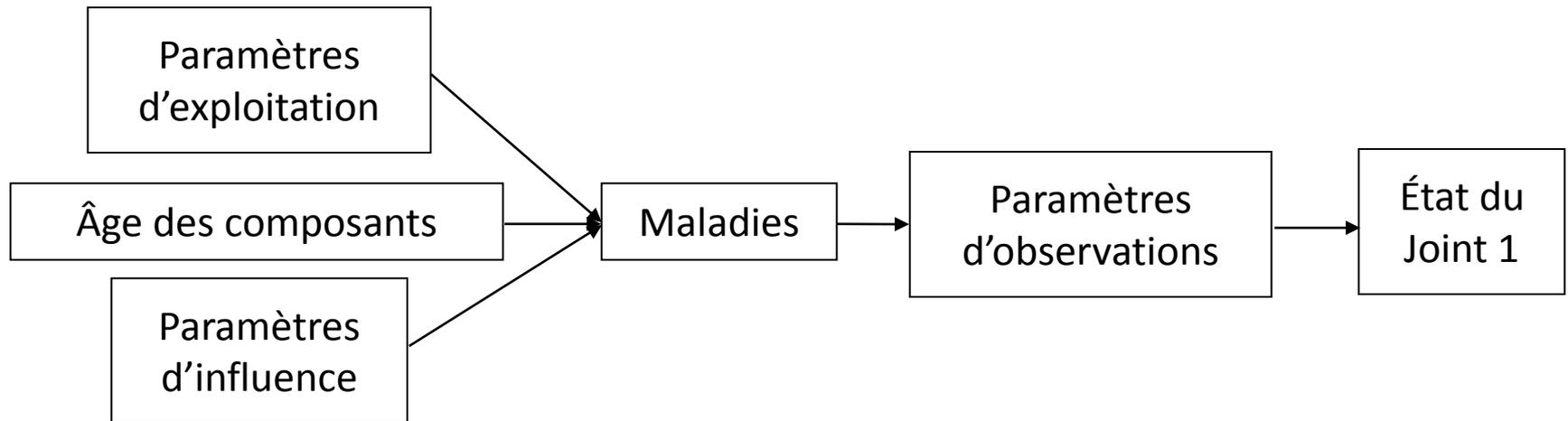
- Système mécanique d'une centrale nucléaire séparant le rotor des composants statiques
- Fonction: 3 joints assurent l'étanchéité dynamique entre le fluide (contenu dans la pompe primaire) et l'extérieur
- Joint 1 est un joint d'étanchéité dynamique de type hydrostatique à fuite contrôlée
- Subit des pressions de l'ordre de 155 bars
- Pression en aval du joint 1 de 2 à 3 bars

Objectifs

- Mieux comprendre le processus de vieillissement
 - Modéliser sa durée de vie
 - Modéliser **l'interaction** entre diverses variables
 - Estimer la **probabilité** de **dégradation** ou de **défaillance**
 - Détecter les variables **explicatives les plus significatives**
- Mieux maîtriser les risques, et mieux maîtriser les coûts :
 - Trouver des **actions de maintenance appropriées**
 - Quantifier **l'impact** d'une action de maintenance
 - Différer ou éliminer le vieillissement
- Aider à l'optimisation de maintenance :
 - Analyse de sensibilité
 - Analyse de données
 - Aide au **diagnostic**
 - Aide à la **décision**

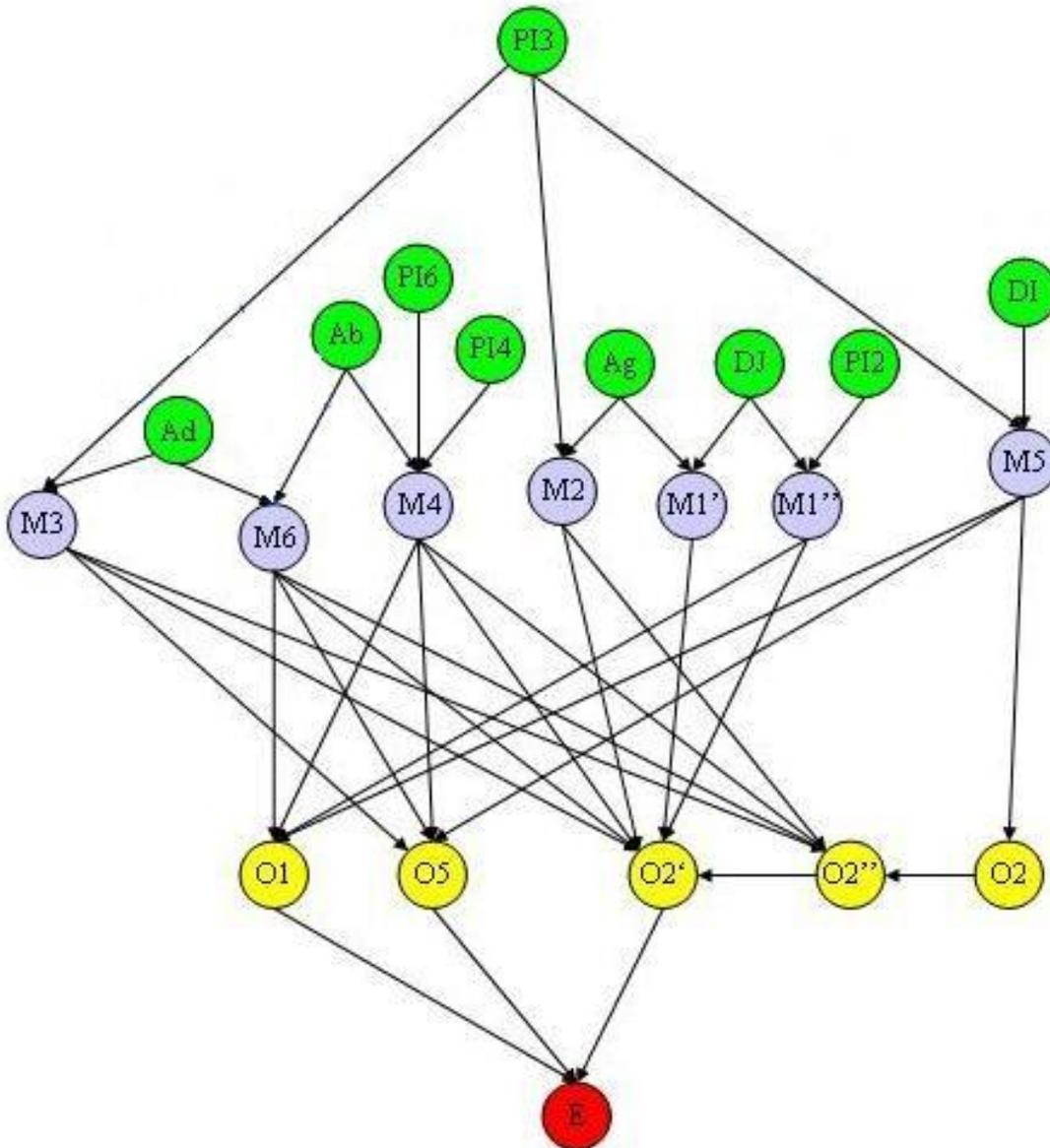
Construction de la structure du réseau

- Regroupement des variables de manière hiérarchique



- Ordre naturel = causalité
- Trois types de variables :
 - d'entrée (indépendantes)
 - intermédiaires
 - expliquées (d'intérêt)

Réseau bayésien du joint 1 d'une pompe primaire 900 MW



Ad : âge de la douille

Ab : âge de la bague

Ag : âge de la glace

PI2 : débit au démarrage à 25 bars

PI3 : présence d'impuretés dans RCV

PI4 : vibrations et déplacement d'arbre

PI6 : températures du palier pompe

DI : débit inverse

DJ : démontage joint

M1' : éclats, fissures des glaces

M1'' : traces de frottement des glaces

M2 : modification des profils glaces par usure

M3 : dégradation douille logement par usure

M4 : dégradation de l'étanchéité secondaire

M5 : mauvais positionnement des glaces

M6 : coulissement difficile de la bague

O1 : niveau moyen du débit de fuite

O5 : sensibilité anormale du joint

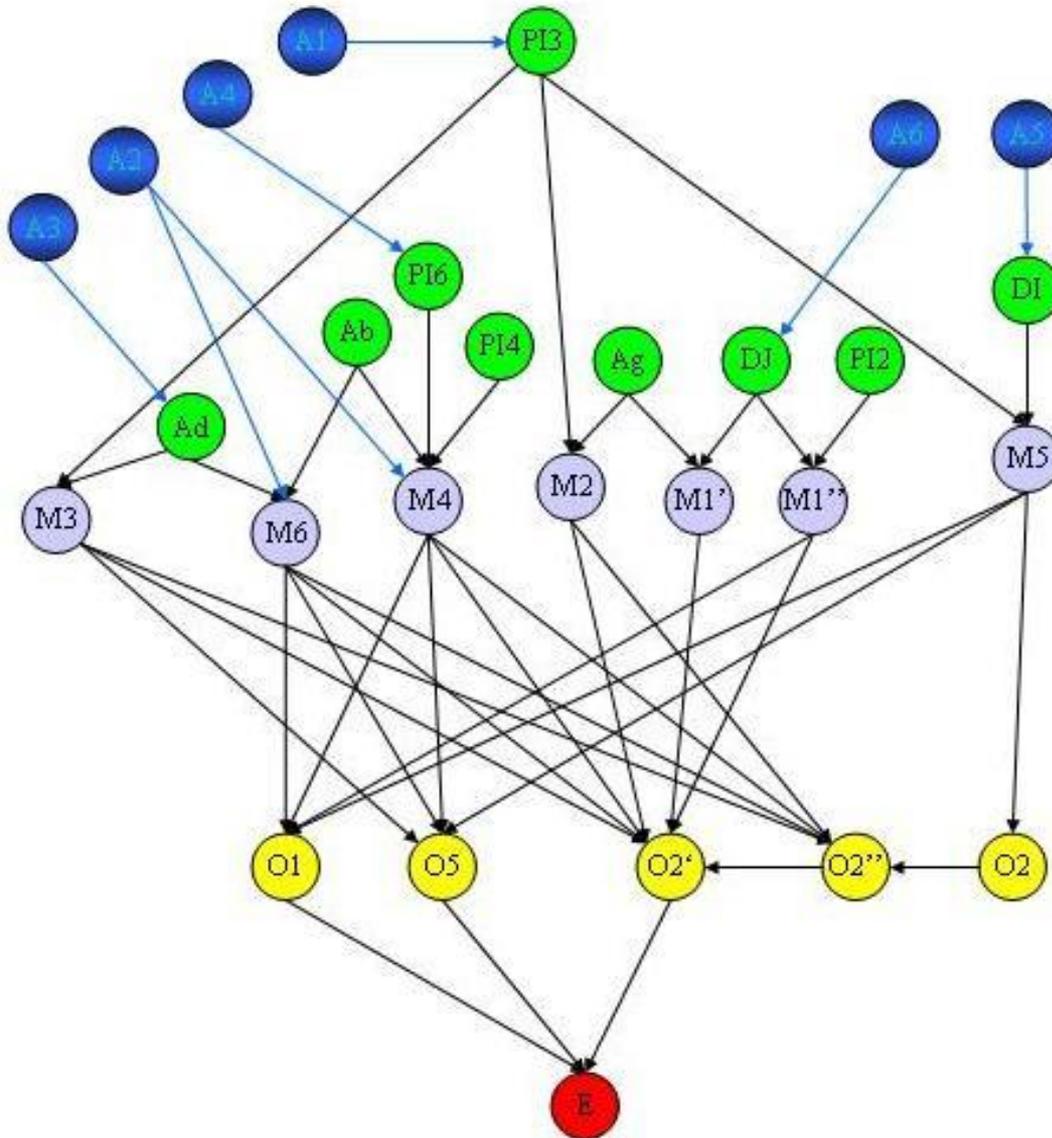
O2' : plage de variation du débit de fuite

O2'' : monotonie du débit de fuite

O2 : stabilité du débit de fuite

E : état du joint 1

Réseau bayésien du joint 1 avec l'intégration des actions de maintenance



- A1 : mise en place d'un filtre
- A2 : mise en place de procédures de montage
- A3 : changement de douille plus fréquent
- A4 : mise en place de procédures d'exploitation
- A5 : meilleures procédures de requalification
- A6 : mise en place de maintenance conditionnelle
- Ad : âge de la douille
- Ab : âge de la bague
- Ag : âge de la glace
- PI2 : débit au démarrage à 25 bars
- PI3 : présence d'impuretés dans RCV
- PI4 : vibrations et déplacement d'arbre
- PI6 : températures du palier pompe
- DI : débit inverse
- DJ : démontage joint
- M1' : éclats, fissures des glaces
- M1'' : traces de frottement des glaces
- M2 : modification des profils glaces par usure
- M3 : dégradation douille logement par usure
- M4 : dégradation de l'étanchéité secondaire
- M5 : mauvais positionnement des glaces
- M6 : coulissement difficile de la bague
- O1 : niveau moyen du débit de fuite
- O5 : sensibilité anormale du joint
- O2' : plage de variation du débit de fuite
- O2'' : monotonie du débit de fuite
- O2 : stabilité du débit de fuite
- E : état du joint

Le diagnostic - conclusion

- Le diagnostic est une **photographie** de l'état physique d'un SSC à un instant d'observation. Il fait partie du bilan de comportement.
- Les limites
 - un retour d'expérience non validé
 - des informations incomplètes
 - le vieillissement
 - l'évolution des conditions d'exploitation –environnement
 - maintenance, des organisations, réglementaire

4 Le pronostic

- **Identifier (anticiper) les situations potentiellement pénalisantes** (ici: les défaillances) en termes de sûreté et de compétitivité
- **Estimer la durée de vie résiduelle**
- **Définir les actions** à prendre (ici: la maintenance dite exceptionnelle ou prévisionnelle)
- Le pronostic dépend des informations disponibles du passé (le retour d'expérience, les inspections...), du présent (le diagnostic: le *health assessment* du SSC) et du futur (les conditions futures du SSC).
- **La décision de maintenance in fine dépendra:**
 - **du comportement physique** pronostiqué du SSC,
 - de critères économiques (*asset management*); la **fiabilité** s'avère être le facteur prépondérant dans la décision.

$$m_m(t) = \frac{\int_t^\infty \int_a^b R(u, \theta) \cdot \Pi(\theta) d\theta du}{\int_a^b R(t, \theta) \cdot \Pi(\theta) d\theta} = \frac{\int_t^\infty R_m(u) du}{R_m(t)}$$

Un indicateur quantitatif: la MRL

Residual life ou remaining life : actual period from a stated time to retirement of an SSC (EPRI, 1993)

Les difficultés liées à l'estimation de la MRL

- Connaissance des conditions futures d'exploitation – environnement – maintenance
- Evolution (loi) de la fiabilité (du vieillissement)
- Confiance dans l'expertise
- Incertitudes sur l'estimation des paramètres

Les méthodes de pronostic

(panorama non exhaustif)

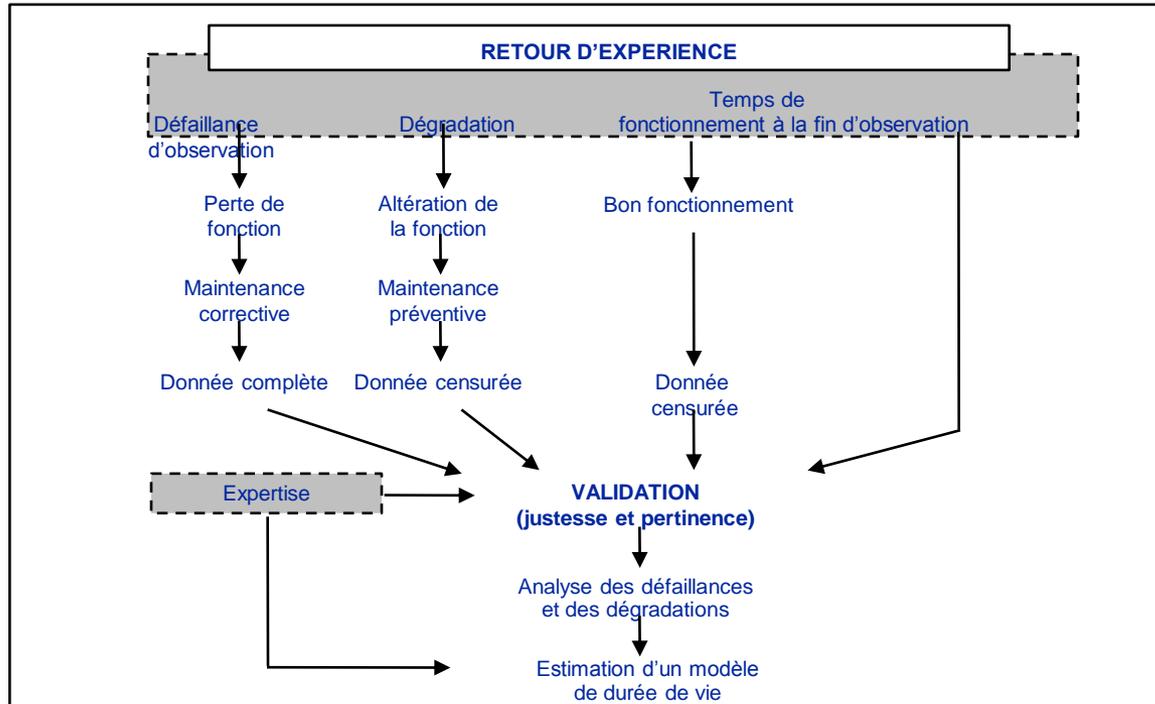
- *à partir du retour d'expérience* : CBR, **méthodes de détection (graphiques, bayésiennes), méthodes d'estimation fiabiliste dans un contexte très censuré**, efficacité de la MP (modèles ARI, ARA)
- *à partir des données du retour d'expérience d'inspection* : lois de dégradation, ... processus gamma
- *à partir des données de surveillance* : modèle de Cox, analyse de données (ACP, classification, arbre de segmentation, méthodes par apprentissage statistique...), estimation d'état par extrapolation d'un paramètre caractéristique de la dégradation, **comparaison surveillance / fiabilité**
- *à partir de retour d'expérience et d'expertise* : **méthodes d'anticipation AVISE, PMDA-PIRT**
- *à partir de modèles physiques* : TLAA, comptabilisation des situations (cas de la fatigue, ...), critère de Miner; simulation
- *à partir de simulations du comportement probabiliste de systèmes* : réseaux de Petri, PDMP, étude du type prospective (utilisation des RB), ...

Quelques méthodes à partir du retour d'expérience

- **CBR** (*Case Based Reasoning*): appel au retour d'expérience pour résoudre un problème; on retrouve des cas **analogues** dans une K-DB pour générer un pronostic et une solution; après validation, le nouveau cas devient une connaissance (apprentissage) (Leake, 1996)
- Les **méthodes graphiques**: par exemple, la **méthode TTT** (*Total Time on Test*) (Klefsjö, 1982),
Classement des défaillances d'un SSC, réparable ou non
Pronostic: constance ou IFR ou DFR
Confiance par un test de Barlow-Proshnan
- Les **méthodes bayésiennes** pour la détection d'un vieillissement (Clarotti et al, 2004)

Les méthodes fiabilistes, le traitement des données de défaillance et de dégradation

- Sélection d'un échantillon sur critères
- Analyse qualitative, validation (au sens de la pertinence)
- Traitement, analyse statistique, analyse fiabiliste
- Interprétation
- Analyse des CR spécifiques: maintenance, sûreté, facteurs humain et organisationnel, matériaux, ...



Le processus de validation, d'estimation

Dans le retour d'expérience industriel, on observera très souvent un faible nombre de défaillances avec un grand nombre de données de survie tronquées ou censurées à droite de type I.

Le calcul d'une loi de fiabilité

En conception, comme en exploitation:

- le retour d'expérience est essentiel, il permet la surveillance du SSC (pour la maîtrise des dégradations), il traduit le facteur d'usage
- la maintenance préventive perturbe le comportement réel du SSC
- des informations complémentaires sont nécessaires comme: profil de fonctionnement futur, programmes de maintenance, essais de fiabilité, calculs physiques, expertise (de concepteurs et d'ingénieurs de maintenance), simulation de données, recueils de données, retour d'expérience analogue, informations de veille

	Retour d'expérience (données de défaillance, historique de maintenance, temps de fonctionnement)		
Type de composant	Absence de données de défaillance	Quelques données de défaillance	Plus de 20 données de défaillance
Actif	Méthode du Khi-2 Méthode de la confiance intégrée Méthode min-max de la vraisemblance	Méthodes bayésiennes Méthodes fréquentielles avec simulation des données incomplètes	Méthodes fréquentielles (maximum de vraisemblance ...) (ou bayésiennes)
Actif en attente	Méthode du Khi-2 Méthode de la confiance intégrée Méthode min-max de la vraisemblance	Méthodes bayésiennes	Méthodes fréquentielles (maximum de vraisemblance ...) (ou bayésiennes)
Passif	Méthodes contrainte-résistance Analyse de fiabilité des structures	Analyse de fiabilité des structures ou méthodes bayésiennes	Méthodes fréquentielles (maximum de vraisemblance ...) (ou bayésiennes)

Méthodes et outils d'évaluation d'une loi de fiabilité opérationnelle

On consultera (Bacha et al, 1998), (Lemaire, 2005), (Lannoy, Procaccia, 2006), (Gerville-Reache et al, 2011), (Ferton et al, à paraître, 2011) pour la présentation de méthodes de calcul d'une loi de fiabilité.

Eireda 2000

File Mode Edit View Switch Mode Help

C:\PROGRAM FILES\EIREDA2 Failure Type EPS

Mechanical Electrical

Component Pump Feedwater Main Pump 900.

Function Main Feedwater Pump ANG 001 002 PO APP 001 002 003 004 PO CP1,CP2

		Failure Rate lamda/h[E-G]		Probability of Failure on Demand Gamma/d[E-3]		Repair Time T : h	Sample	
		Lambda/h	Lambda min	Gamma/d	Gamma min		Plant * year	Eq/Plant
Prior	Critical	6,3	4,68	0,26	0,15	33		
		EF	Lambda max	EF	Gamma max	M/h		387
			8,19		0,38	98		
Likelihood		Nb Failure	Cumulative Time (h)	Nb Failure	Nb Demands	Mtr : h		
		9	3.30E+06	2	1,77E+04	35		514
Posterior Probability Interval			4,96		0,21	Man * h		Unavailability (MWh)
			90 %		90 %	1109		
			3,8		0,13	0,31		
Post Pdf Parameters	Gamma	43,2	8699171	Beta	14,9	68694		
Failure Mode	Mode	External leak (7 déf. (50%))		Mode	Loss of lubrication (4 déf. (28.5%))			
Other Sources	Critical	0,5	10					
	EG&G							
Records		Reference		Date	08-26-2000			
Comments	EPS Prior:reference data from all feedwater system pumps (CEX_APP.VTN.ACO)							

Engineering Characteristics

Type:Centrifugal ,Turbine Driven
Power (kW):2240/4840
Flowrate (m3/h):1600/3240
Head (M):310/570
RPM:980/4840
Temp (°C):270

Operational Characteristics

Operating Mode on annual basis : permanent

Operating Time : 6280

Number of demands : 44

Maintenance Policy : 1R type B 2R type C

Test Periodicity : 4 weeks 1R

For Help, press F1

Démarrer | Gestionnaire d... | Inbo...-Dossie... | Microsoft Pow... | Eireda 2000 | 15:34

Extrait du recueil EIREDA'2000. Données concernant les pompes alimentaires principales (centrales REP 900 MW)

On constate une réactualisation bayésienne des données de fiabilité : l'a priori correspond à l'observation des défaillances critiques pour la sûreté sur la période 78/87 (distribution a priori des données EPS) ; la vraisemblance correspond aux défaillances observées sur la période 88/98 ; la distribution a posteriori (loi gamma, loi beta) des performances de fiabilité est précisée, ainsi que la moyenne et l'intervalle de crédibilité à 90% ; une comparaison est faite avec un autre recueil (ici le recueil EG&G) ; EF est le facteur d'erreur

A noter qu'un recueil de données constitue aussi un outil de surveillance des performances de fiabilité du SSC.

Le retour d'expérience d'inspection

- Effets mesurés: longueur de fissure, perte de matériau, ..., le mécanisme étant connu
- Difficultés: inspection partielle, performances des capteurs, probabilité de détection d'un défaut, données censurées, ...
- Recherche d'une loi de dégradation, d'une cinétique, d'un niveau de dégradation comparée à une valeur seuil; évaluation d'une durée de vie restante
- Lois physiques
 - fatigue: nombre et amplitude des cycles de contraintes
 - corrosion: temps d'exposition et conditions environnementales
 - fluage: température, niveau de contrainte et temps
 - usure: charge et longueur de glissement
- Méthodes physico-statistiques
- Méthodes statistiques: régression, processus gamma, ...

Pronostic à partir de données de surveillance

- Nécessité de trouver une corrélation entre l'état de dégradation du SSC et plusieurs paramètres mesurables
- Analyse des données (ACP, classification, régression logistique ...): familles de défaillances, classes de problèmes, état de dégradation...
- Statistiques de réseaux
- Modèle de Cox (hasards proportionnels):

$$h(t, Z) = h_0(t) \cdot \exp(-B \cdot Z)$$

Z: vecteur des covariables explicatives

Approche fiabiliste	Surveillance
Investissement faible	Modéré
Démarche mathématique	Loi de dégradation souvent inconnue
Données de défaillance (perte de fonction) et de maintenance	Effets mesurables
Petits échantillons	Echantillons importants rendant l'analyse difficile
Incertitudes, simulations	Prévisions à court terme

Pronostic à partir de calculs physiques

Analyses TLAA (*time limited aging analysis*)

Exemple de la **fatigue thermique**

- Modélisation EF thermo-mécanique
- Comptabilisation des situations (nombres de cycles, amplitudes)
- Application du critère de Miner: on en déduit la durée de vie déjà consommée, la durée de vie restante , l'impact des conditions de fonctionnement

Pronostic à partir de retour d'expérience et d'expertise: les méthodes d'anticipation

Approches développées dans le domaine nucléaire :

- Méthode AVISE (eDF)
- Méthode PMDA-PIRT (US NRC)

Pronostic à partir de retour d'expérience et d'expertise: les méthodes d'anticipation

Contexte et enjeux industriels :

- Importants enjeux de sûreté
- Faible retour d'expérience
- Prolongation de l'exploitation des centrales nucléaires au-delà de la durée d'exploitation prévue à la conception (40 ans)

 Anticipation des défaillances dues au vieillissement à l'horizon 50 ou 60 ans

Pronostic à partir de retour d'expérience et d'expertise: les méthodes d'anticipation

La démarche d'anticipation s'appuie sur :

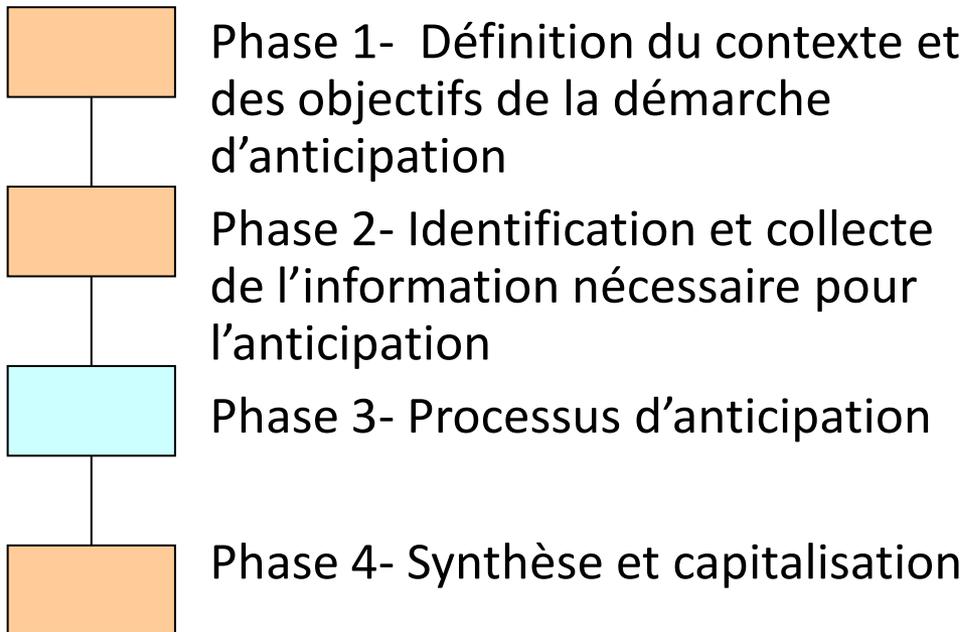
- un ensemble de données et d'informations de différentes natures : données de conception; données de retour d'expérience, politique de maintenance, ...
- l'expertise
- un ensemble de méthodes et d'outils

Méthode AVISE (eDF)

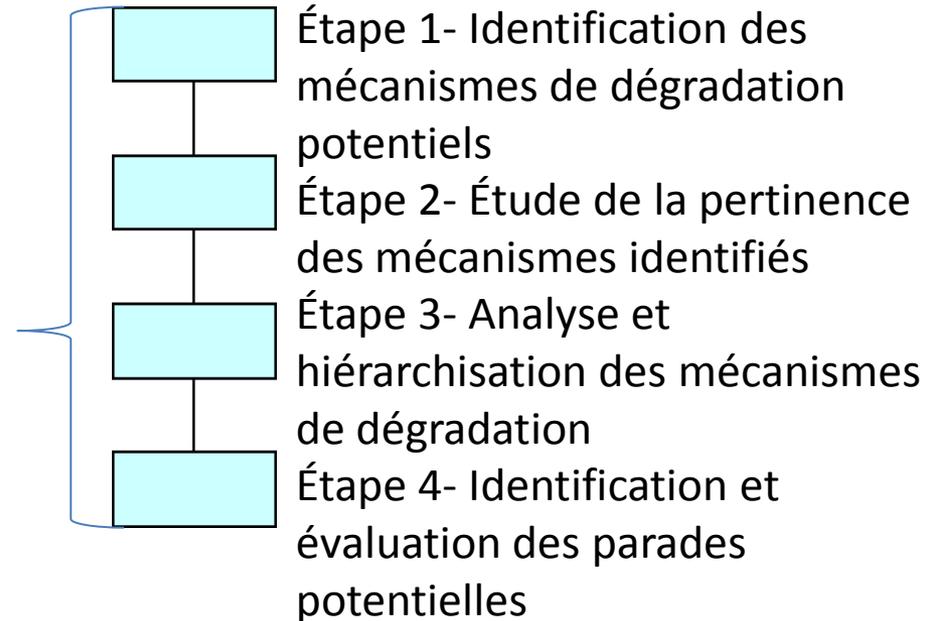
- Développée en partenariat avec L'Ecole Centrale Paris (Marle, 2005)
- Application à un composant passif d'une centrale nucléaire : le pressuriseur (2005)
- Adaptation de la démarche à l'anticipation de défaillances pour un composant actif (2010)
- AVISE permet :
 - de juger l'état physique des composants.
 - d'identifier les problèmes potentiels que peut provoquer le vieillissement et d'adapter la maintenance nécessaire afin de le maîtriser.

Méthode AVISE (eDF)

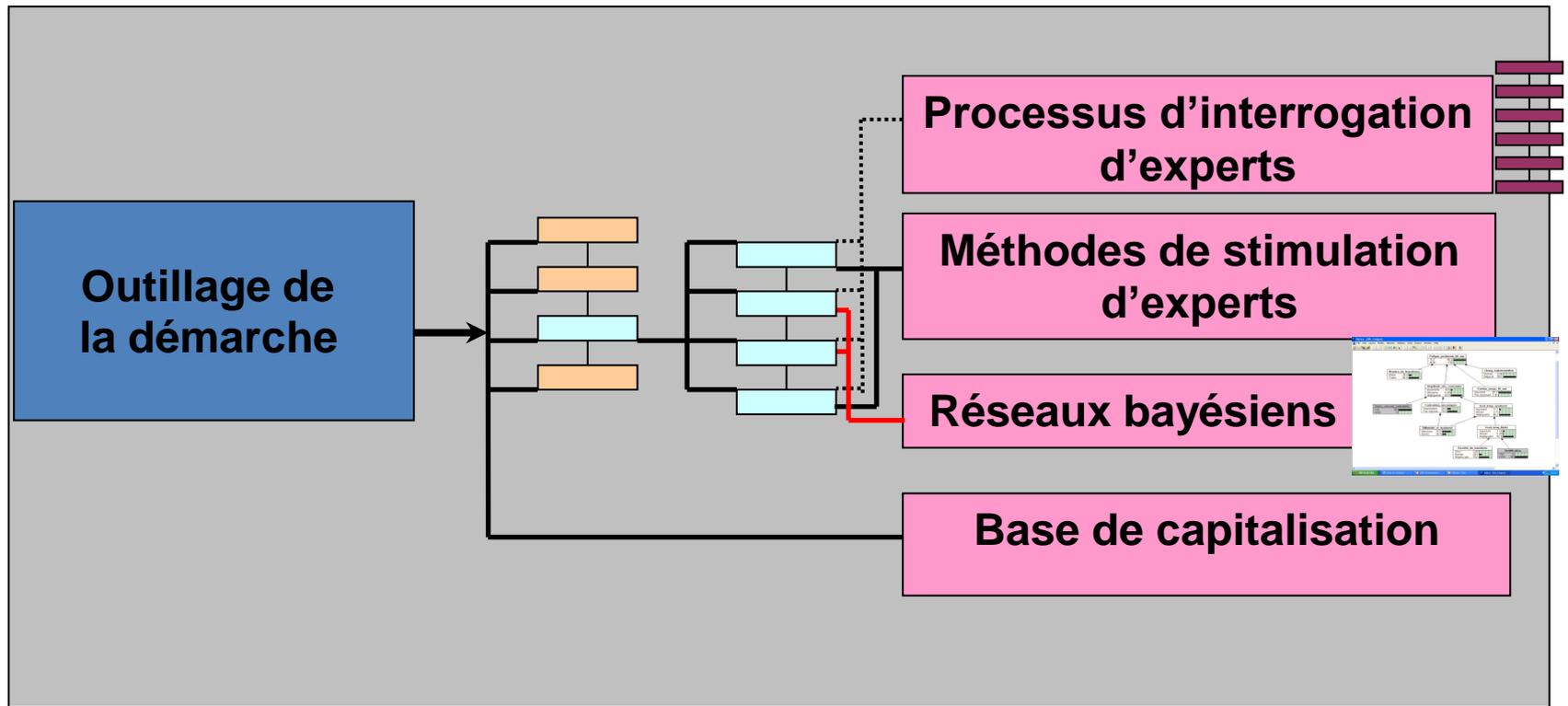
Démarche globale d'anticipation : AVISE



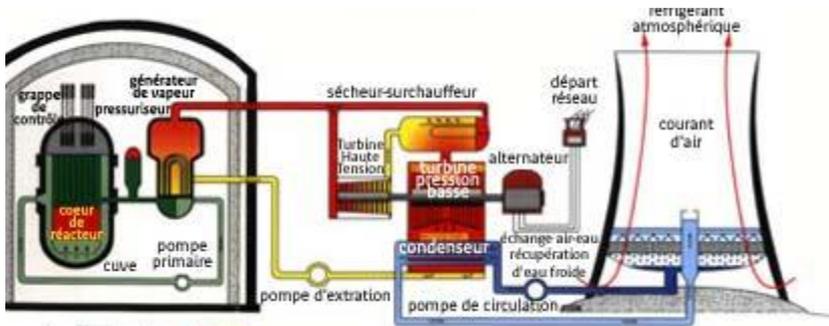
Processus d'anticipation



Outillage de la démarche AVISE



Application de la démarche AVISE à un matériel passif d'une centrale nucléaire : le pressuriseur



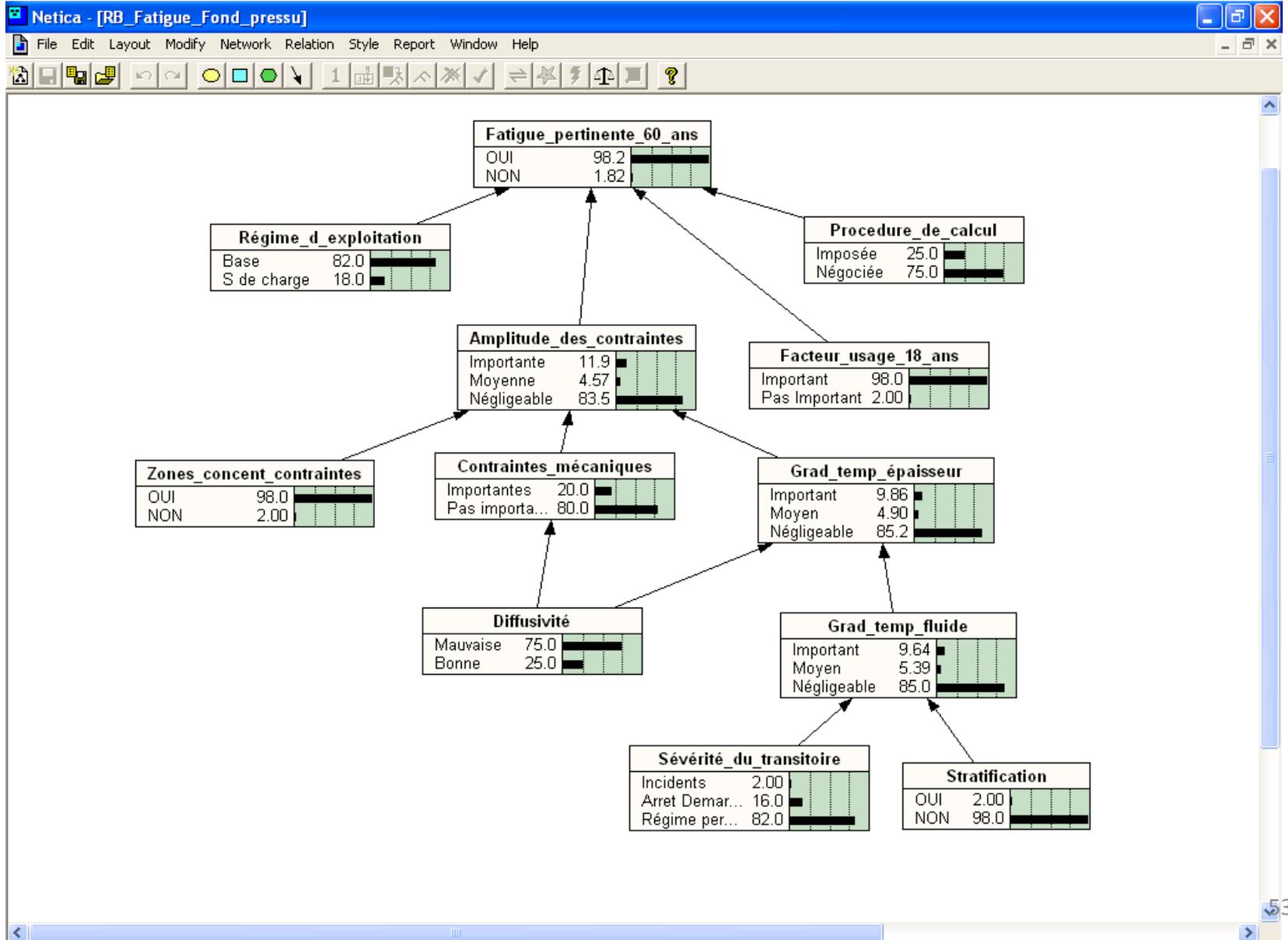
Le processus de l'anticipation

- Réunion collective d'experts pour l'identification des mécanismes de dégradation potentiels : 42 triplets zone/mécanisme de dégradation/mode ont été identifiés.
- Réunions individuelles et réunion collective d'experts pour l'étude de la pertinence et de la criticité des défaillances potentielles identifiées : réseaux bayésiens et hiérarchisation des triplets selon leur criticité (14 triplets critiques ont été identifiés).
- Réunion collective d'experts pour l'identification de parades potentielles: pour 3 triplets critiques.

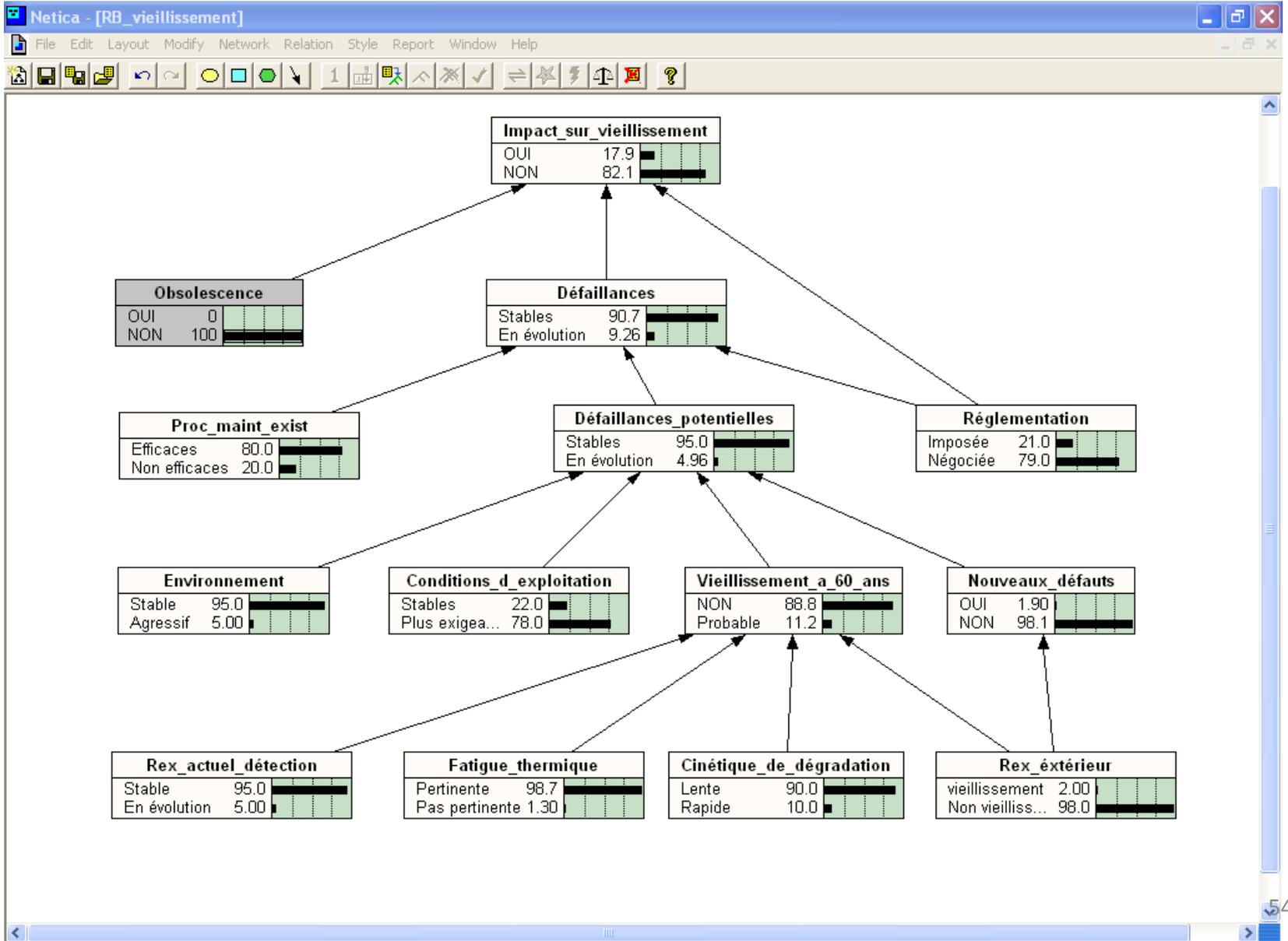
• Fonctions :

- Éviter la vaporisation dans le cœur du réacteur
- Protéger le CP contre les surpressions.
- Reprendre les variations de volume du fluide primaire.

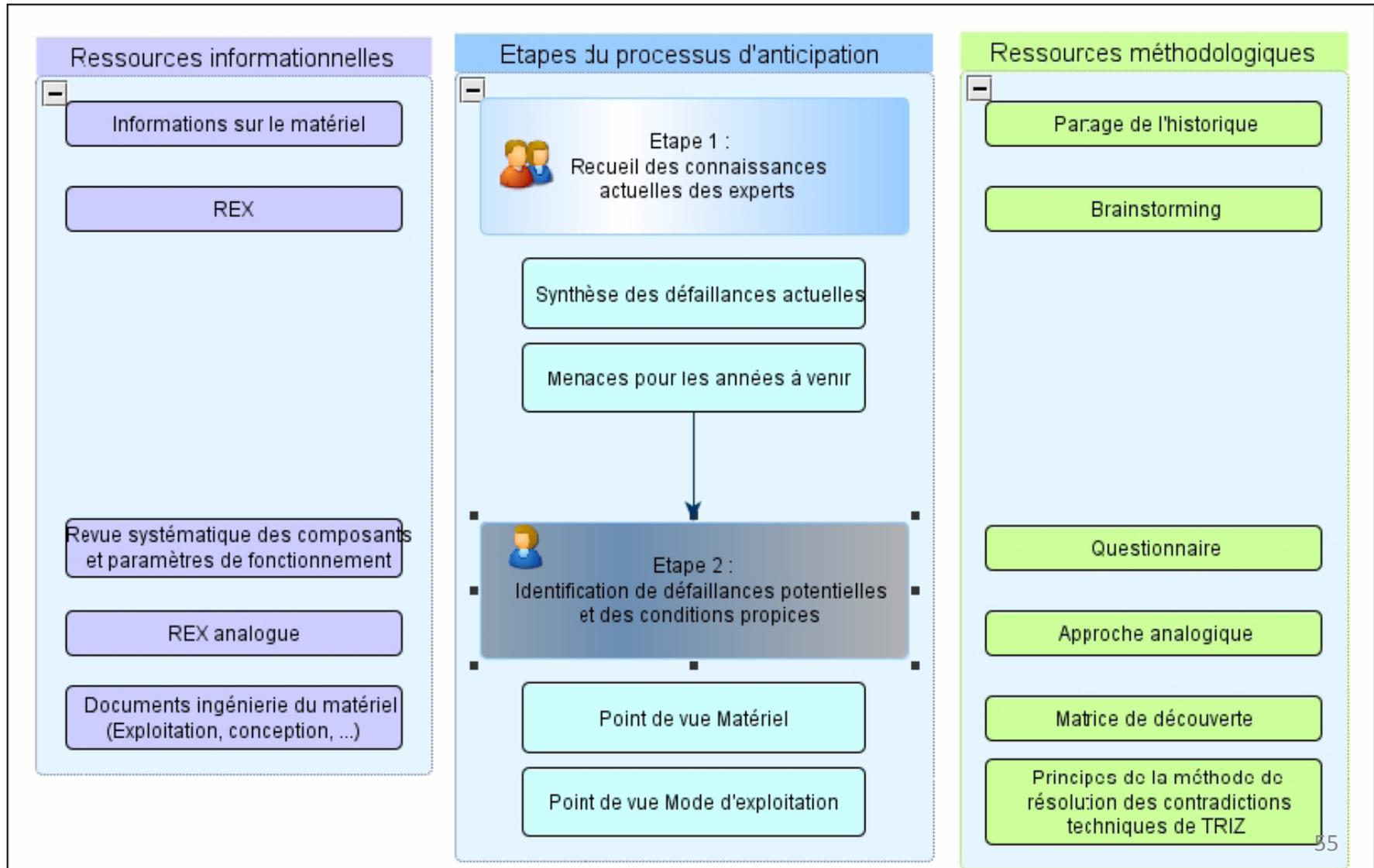
Réseau bayésien : pertinence de la fatigue thermique



Réseau bayésien : impact sur le vieillissement



Adaptation de la démarche AVISE aux matériels actifs



La Méthode PMDA-PIRT (US NRC, 2007)

Contexte de développement

3 constats :

- occurrence de dégradations non prévues
- un manque d'anticipation dans la gestion des défaillances dues aux dégradations (mise en place de mesures d'inspection et de mesures correctives coûteuses suite à des constats de dégradations)
- la prolongation de la durée d'exploitation peut favoriser de nouveaux mécanismes de dégradation non prévus.

La Méthode PMDA-PIRT (US NRC)

Démarche :

1- Identification des matériels et des zones critiques vis-à-vis des mécanismes de dégradation :

1.1- Mécanismes de dégradation avérés : réunion d'un groupe d'experts pendant 1 semaine en s'appuyant sur le retour d'expérience : le rapport GALL (*Generic Aging Lessons Learned*), BDDs de REX

1.2- Mécanismes de dégradation potentiels : application de l'approche PIRT (*Phenomena Identification and Ranking Table(s)*) avec un groupe d'experts en matériaux et en ingénierie : 7 réunions de groupes d'experts de 5 jours chacune. L'analyse est basée sur le REX des matériaux concernés, le REX analogue (matériaux, conditions d'exploitation, ...), l'expertise, les modèles de dégradation, ...

La Méthode PMDA-PIRT (US NRC)

Démarche :

1,2,1- Identification de sous-groupes de matériels pouvant être concernés par les mêmes mécanismes de dégradation (370 sous-groupes de 2200 matériels)

1,2,2- Evaluation de la pertinence d'un mécanisme de dégradation pour un sous-groupe donné (1100 analyses).

Résultat : un rapport final (2006) des matériels ayant subi des dégradations ou pouvant subir des dégradations potentielles avec une évaluation de la pertinence de ces mécanismes, des moyens de surveillance et de contrôles non destructifs.

La Méthode PMDA-PIRT (US NRC)

Démarche :

2- Pour chaque matériel identifié (2005) :

- Evaluation de la probabilité conditionnelle de fusion du cœur comme outil d'hierarchisation et de choix d'investissements.
- Evaluation de la probabilité de défaillance et des incertitudes.

3- Mise en place d'un programme de recherche international depuis 2005 sur l'anticipation des défaillances dues aux dégradations : matériaux, mécanismes de dégradation, surveillance, inspections (contrôles non destructifs), actions sur les contraintes (chimie, température, ...) et maintenance prévisionnelle (remplacement, re-conception, ...).

Comparaison des méthodes AVISE et PMDA-PIRT

AVISE	PMDA-PIRT
Point du vue de l'exploitant	Point du vue de l'autorité de sûreté
Prise en compte du contexte spécifique de chaque installation	Prise en compte du contexte générique
Approche opérationnelle	Approche collective et participative

Conclusions et perspectives de R&D

- Le pronostic nécessite un diagnostic préalable.
- Ce diagnostic est établi à partir des connaissances disponibles et essentiellement à partir de l'analyse du retour d'expérience (par conséquent stratégique pour les entreprises).
- Plusieurs méthodes existent pour pronostiquer le comportement futur du SSC, notamment les méthodes d'anticipation et les méthodes fiabilistes.
- La qualité du diagnostic et du pronostic dépendent des connaissances disponibles.
- Toute information disponible, quelle qu'elle soit, même si elle est vague ou incomplète, impacte la qualité du diagnostic et du pronostic et doit être prise en compte car elle améliore la connaissance et réduit donc l'incertitude.

Conclusions et perspectives de R&D

- Les SSC d'un système sont très hétérogènes. Chaque SSC nécessite une démarche de diagnostic-pronostic spécifique, pour surveiller et analyser son comportement. Elaborer une démarche unique de diagnostic-pronostic pour un système complexe semble difficile (voire illusoire).
- Les modèles physiques de défaillance sont probablement les plus efficaces pour réduire l'incertitude. Ils sont cependant difficiles à obtenir dans les conditions réelles de service.
- La décision de maintenance est souvent prise sur la base de critères économiques (les gains attendus) ou d'exigences réglementaires.
- Le domaine du diagnostic – pronostic en fiabilité et maintenance industrielle est encore au stade de la recherche et développement , même si l'on trouve des applications dans différents secteurs industriels (aérospatial, ferroviaire, nucléaire).

Quelques perspectives de R&D

- Détection d'un vieillissement
- Performances des capteurs
- Lois de dégradation
- Méthodes d'estimation de la MRL d'un SSC
- Efficacité de la maintenance
- Impact du FH sur l'efficacité de la maintenance
- Seuils acceptables, fiabilité acceptable

6 Pour en savoir plus...

Normes

EN 13306: 2001, *Terminologie de la maintenance*.

EPRI, Electric Power Research Institute, *Common Aging Methodology*, february 1993.

Références

Bacha M., Celeux G., Idée E., Lannoy A., Vasseur D.(1998), *Estimation de modèles de durées de vie fortement censurées*, collection de la direction des études et recherches d'Electricité de France, Eyrolles, 99.

Bérenghier C., Dieulle L., Grall A., Roussignol M. (2003), *Maintenance policy for a continuously monitored deteriorating system*, Probability in the Engineering and Information Science, 17, 235-250, 2003.

Bouzaïene-Marle Leïla, (2005), *AVISE, anticipation des défaillances potentielles dues au vieillissement par analyse du retour d'expérience*, thèse de l'Ecole Centrale Paris, 4 avril 2005.

Cagnac Albannie, Parfouru Samuel et Bécheriot Philippe, (2010) *Méthodologie d'interrogation d'experts pour l'anticipation de défaillances pour un matériel actif*, λμ 17, La Rochelle, 05-07 octobre 2010.

Pour en savoir plus...

Clarotti C, Lannoy A, Procaccia H, Villain B. (1994). *ARCS : outil logiciel pour la quantification de l'effet de la maintenance sur la durée de vie*, Colloque $\lambda\mu$ 9, ESREL'94, La Baule.

Clarotti C., Lannoy A., Odin S., Procaccia H.(2004), *Detection of equipment aging and determination of the efficiency of a corrective measure*, Reliability Engineering and System Safety, Volume 84, Issue 1, Avril 2004, 57-64.

Corset F. (2003), *Aide à l'optimisation de maintenance à partir de réseaux bayésiens et fiabilité dans un contexte doublement censuré*, Thèse réalisée au sein du laboratoire INRIA Rhône-Alpes, projet IS2, 2003.

Corset F., Celeux G., Lannoy A., Ricard B. (2006), *Designing a bayesian network for preventive maintenance from expert opinions in a rapide and reliable way*, Reliability Engineering and System Safety, Vol 91/7, 849-856.

Cox D. (1972), *Regression models and life tables* (with discussion), Journal of the Royal Statistical Society, serie B, 34, 187-220.

Pour en savoir plus...

Doyen L. (2004), *Modélisation et évaluation de l'efficacité de la maintenance des systèmes réparables*, Thèse de l'INPG, Grenoble, 22 novembre 2004.

ESReDA (2007, 2010), actes des séminaire d'Alghero et de Peks.

Ferton E., Procaccia H., Procaccia M. (2011), *Fiabilité et maintenance des matériels réparables et non réparables*, livre à paraître, Lavoisier, Editions Tec&Doc.

Gerville-Reache L., Bayle F., Couailler V., (2011), *Quatre approches pour l'estimation d'une probabilité de défaillance exponentielle à partir d'un unique essai zéro défaillance réussi*, journée SFdS du 14/01/2011, Paris.

IMdR, *Modélisation des dégradations des structures et optimisation de leurs inspections*, avril 2009.

Jardine A.K.S., Makis V. (1992), *Optimal replacement in the proportional hazards model*, Infor, volume 30, n°1, février 1992.

Joseph Muscara , Nilesh C. Chokshi & Michael A. Switzer, (2005), *Proactive materials degradation assessment (PMDA)*, 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18), Beijing, China, August 7-12, 2005.

Pour en savoir plus...

Klefsjö Bengt (1982), *On aging properties and Total Time on Test transforms*, Scand.j.statist. 9 : 37-41, 1982.

Lannoy A., Procaccia H.(1994), *Méthodes avancées de traitement et d'analyse des bases de données de retour d'expérience*, collection de la direction des études et recherches d'Electricité de France, Eyrolles, 86.

Lannoy A. (2003, révision 2011), *Retour d'expérience technique*, Techniques de l'Ingénieur, SE 1 041v2.

Lannoy A., Procaccia H. (2001), *L'utilisation du jugement d'expert en sûreté de fonctionnement*, Editions Tec&Doc, Lavoisier.

Lannoy A., Procaccia H. (2005), *Evaluation et maîtrise du vieillissement industriel*, Lavoisier, Editions Tec&Doc, 2005.

Lannoy A., Procaccia H. (2006), *Evaluation de la fiabilité prévisionnelle, outil décisionnel pour la conception et le cycle de vie d'un bien industriel*, Lavoisier, Editions Tec&Doc, 2006.

Pour en savoir plus...

Lemaire Maurice (2005). Fiabilité des structures, couplage mécano – fiabiliste statique, en collaboration avec Alaa Chateauneuf et Jean-Claude Mitteau, Hermès Lavoisier

Lorton A., Fouladirad M., Grall A. (2010), Pronostic d'un système complexe: impact de l'information disponible, $\lambda\mu$ 17, La Rochelle, 05-07 octobre 2010.

Tinga T. (2010) , *Advanced maintenance modelling based on physical failure mechanisms*, 38th ESReDA seminar, Peks, mai 2010.

US NRC, *Expert Panel Report on Proactive Materials Degradation Assessment*, NUREG/CR-6923, février 2007.

Zwingelstein Gilles (1995), *Diagnostic des défaillances*, Hermès.