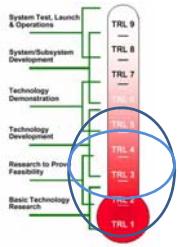


 **La Maintenance Prédictive**

De la Maintenance Prédictive au « Prognostics Health Management » (PHM)



Benoît IUNG
CRAN – Dept ISET
Benoit.iung@univ-lorraine.fr

 CENTRE DE RECHERCHE EN AUTOMATIQUE DE NANCY  UMR 7039  

Avant Propos: le CRAN



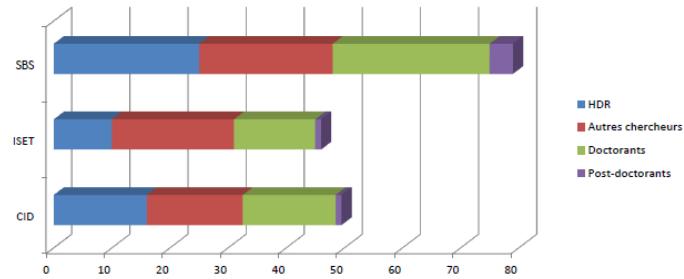
- Avancement des connaissances et des méthodologies
 - pour la modélisation et le pilotage des systèmes dynamiques qu'ils soient techniques, naturels ou vivants
 - des disciplines support : automatique, traitement du signal, génie informatique, photobiologie, cancérologie et neurosciences
 - à la frontière des disciplines, en favorisant les recherches à caractère intégratif et interdisciplinaire, visant à **améliorer la sûreté de fonctionnement des systèmes**, ainsi que le diagnostic médical et les thérapies via l'ingénierie pour la santé

  UMR 7039 

Avant Propos: le CRAN

215 personnes

- 114 chercheurs permanents dont 54 HDR
- 74 doctorants + 6 post-docs
- 31 personnels administratifs et techniques permanents



UMR
7039



Avant Propos: le CRAN

Contrôle-Identification-Diagnostic (36 Ch; Anim: G. Milleroux, D. Sauter)

contrôle, observation, systèmes hybrides, systèmes non linéaires, dynamique complexe, sécurité des communications, surveillance, diagnostic, détection de défauts, commande tolérante, analyse de redondance, reconfiguration

Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques
(31 Ch; Anim: B. Iung et A. Thomas)
Systèmes à Intelligence Ambiente, systèmes contrôlés en réseaux, interopération, pronostic, décision dynamique en maintenance, sûreté de fonctionnement

Santé-Biologie-Signal
(48 Ch)
cancer, épilepsie, cognition, photobiologie, biomarqueurs, nanoparticules multifonctionnelles, spectroscopie, biologie intégrative, signaux physiologiques, imagerie médicale, problèmes inverses, modélisation, signaux multidimensionnels, compression et reconstruction d'images

Sidérurgie Energie
Aéronautique et spatial
Production manufacturière (Plan-34)
Industrie de défense

Instruments de la physique
Santé
Environnement



UMR
7039



Maintenance ... au CRAN

Avant 2000

- **Travaux sur la maîtrise a posteriori ... basée sur le REX**
 - Estimation de paramètres de SdF: Analyse fréquentielle ou Méthodes Bayésienne
 - Estimation de paramètres technico-économiques – Optimisation des plans: Maintenance basée sur la Fiabilité (MBF)

Après 2000, un axe système intégré/intelligent

- Distribution d'une intelligence technique directement dans les composants de terrain (concept avant coureur de **HUMS**)
- Intégration des fonctionnalités distribuées pour favoriser le respect des exigences/performances
- Projets Européens successifs (DIAS, PRIAM, EIAMUG ...)

Opportunité: Projet REMAFEX (96-99)
D'une maintenance classique à une télé-maintenance



□ **Travaux sur une maîtrise a priori ... basée sur l'anticipation des défaillances**

- Fondés les principes d'une **maintenance prévisionnelle**
- Développement de méthodes et techniques de modélisation **de la prise de décision dynamique en maintenance** principalement sur la base d'un processus formalisé de pronostic
- **Dualité décision/action** (décision vis-à-vis des performances – vue système; action vis-à-vis des composants – vue terrain) – Multi niveaux d'abstraction, multi composants ...
- Légitimer cette nouvelle forme d'organisation de cette maintenance (processus distribués, coopérants ...) sous le vocable **d'e-maintenance, maintenance intelligente**



UMR
7039

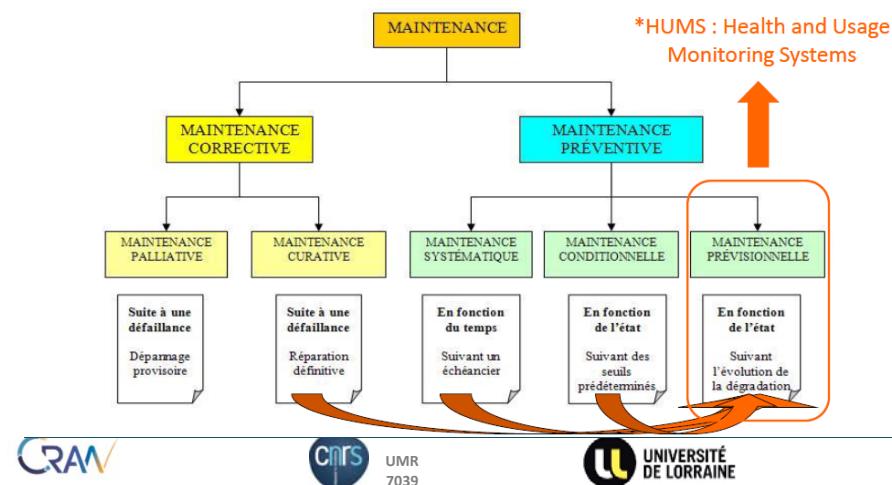


UNIVERSITÉ
DE LORRAINE

Maintenance prédictive / prévisionnelle



Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les **prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien**



Orientation CRAN en maintenance prévisionnelle

1. La maintenance opère sur le composant mais la décision est de niveau système ou fonction: Maintenir ou Rétablir une **PERFORMANCE**, Un **SERVICE**, Un **PRODUIT** (Asset Management)
2. Performance-Service requis tout au long du **CYCLE DE VIE** ... vers une démarche « holistique » de type **INGENIERIE SYSTÈME** (système cible/système de soutien) ... favorisant une optimisation **GLOBALE** des performances/services
3. Maintien en Condition Opérationnelle en regard de nouvelles performances/services par exemple pour intégrer des considérations de **DEVELOPPEMENT DURABLE**, d'économie circulaire



UMR
7039



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE

Orientation CRAN en maintenance prévisionnelle

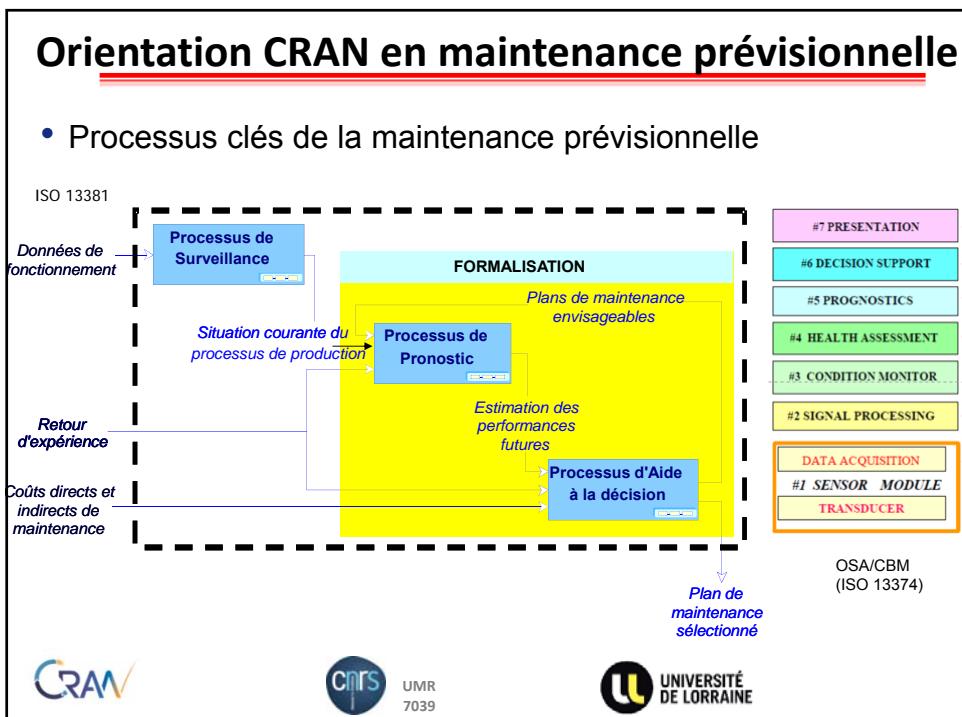
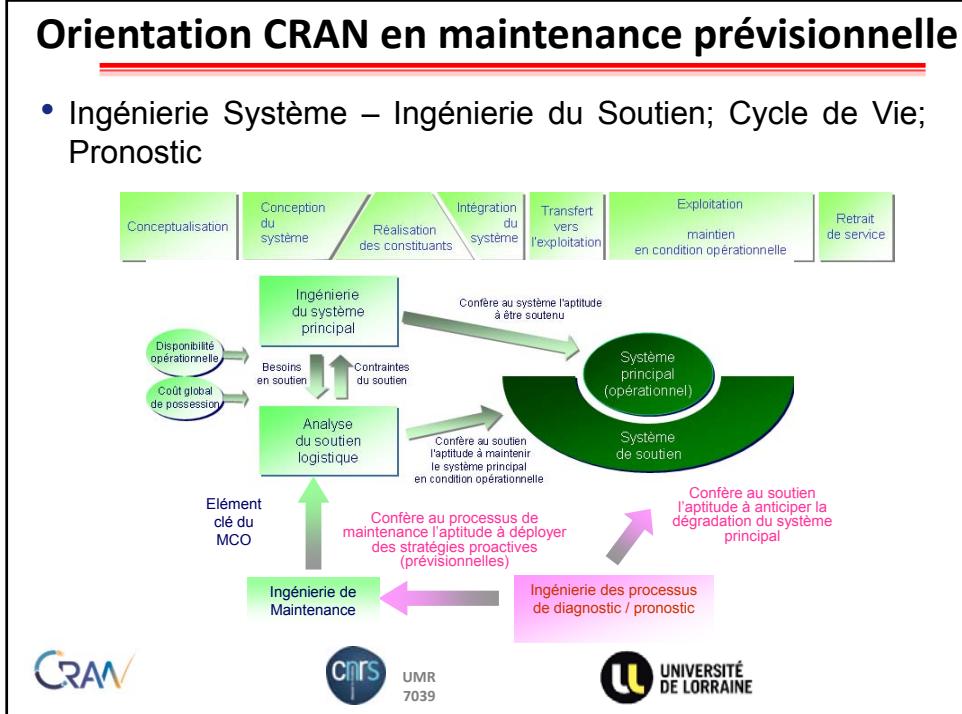
4. Performance/services maintenus ... d'une vision réactive à une vision **ANTICIPATIVE** – Implanter de la **DECISION DYNAMIQUE** basée sur du **BILAN DE SANTE** (détérioration de flux /dégradation d'activité & composant) et du **PRONOSTIC** (Espace **D'OPPORTUNITE**; Maintenance opportuniste)
5. Anticipation issue d'une approche Maintenance **COLLABORATIVE & DISTRIBUÉE** où la collaboration, sur l'ensemble du cycle de vie, s'étend au-delà de la vision des acteurs maintenance traditionnels, jusqu'à l'intégration de **COMPOSANTS INTELLIGENTS** (vision PHM, CBM+, HUMS, smart components) porteurs de leur maintenance
6. Acteurs supports aussi du principe de **FLOTTE**, d'effet parc
7. Vers des architectures de **E-MAINTENANCE** en support de la collaboration à base de technologies innovantes (Technologies ambiantes, Plate forme TELMA de l'AIPL)



UMR
7039

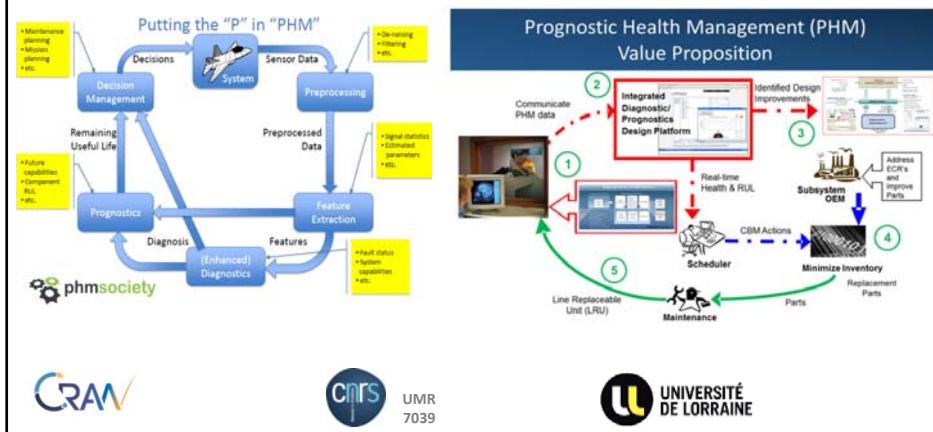


UNIVERSITÉ
DE LORRAINE



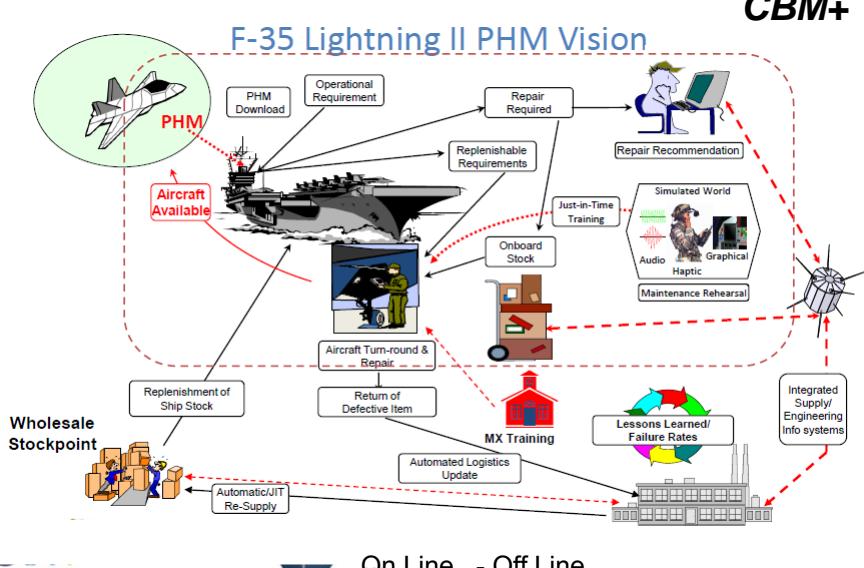
Du prévisionnel au PHM ... IVHM

Le PHM est une « philosophie » émergente qui étend la notion de maintenance prévisionnelle par l'optimisation de la maintenance et la logistique de soutien afin d'accroître la disponibilité opérationnelle et réduire le « Life-Cycle Cost » tout en augmentant potentiellement la fiabilité et l'espérance de vie de systèmes mécaniques, structurels et électroniques.



Du prévisionnel au PHM ... IVHM

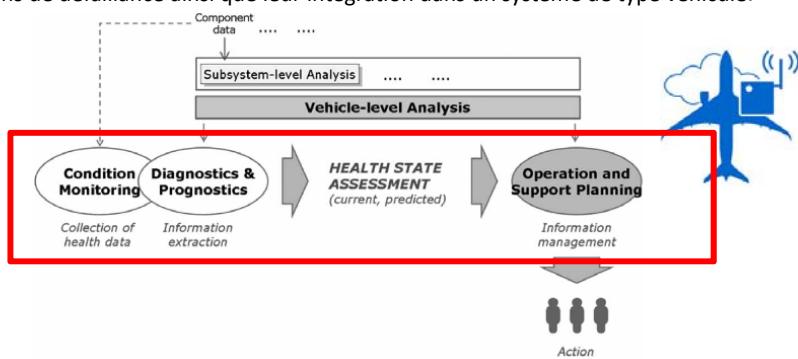
CBM+



Du prévisionnel au PHM ... IVHM

Le PHM est une « philosophie » émergente qui étend la notion de maintenance prévisionnelle par l'optimisation de la maintenance et la logistique de soutien afin d'accroître la disponibilité opérationnelle et réduire le « Life-Cycle Cost » tout en augmentant potentiellement la fiabilité et l'espérance de vie de systèmes mécaniques, structurels et électroniques.

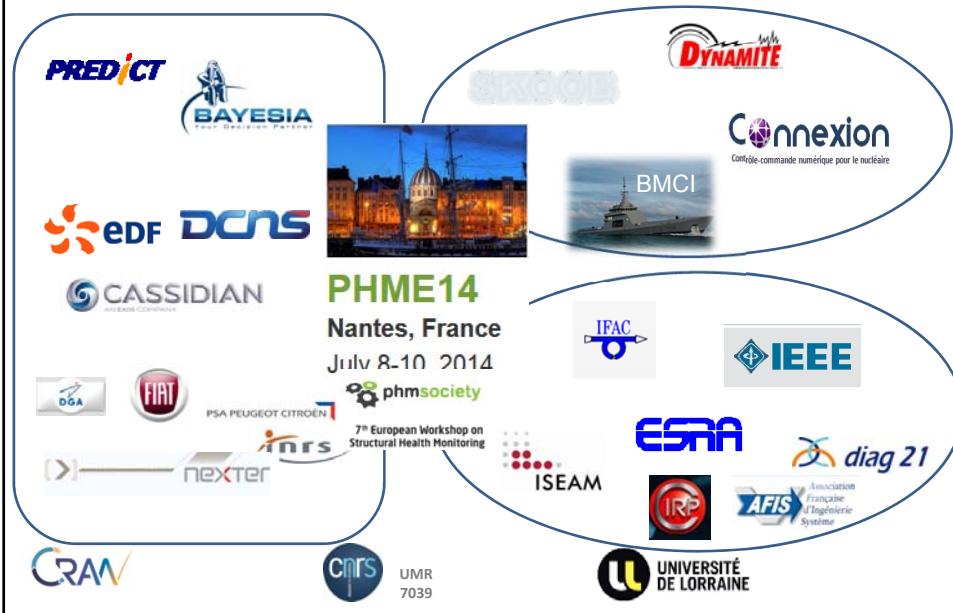
L'IVHM – *Integrated Vehicle Health Management* – discipline de l'ingénierie système comprenant les activités réalisées pour la détection, l'isolation, la résolution et la prédictions de défaillance ainsi que leur intégration dans un système de type véhicule.



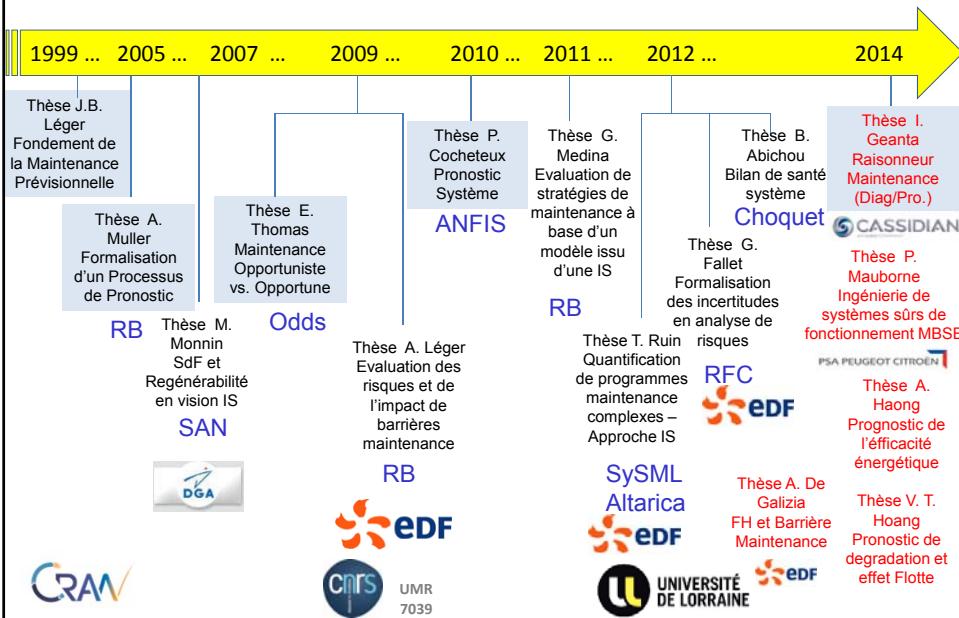
Du prévisionnel au PHM ... IVHM

- **Diagnostic:** Actions menées pour la détection, la localisation et l'identification de la cause d'une défaillance / panne (voire dégradation).
- **Pronostic:** Estimations des durées de vies résiduelles (RULs) avant défaillance et du risque d'existence ou d'apparition ultérieure d'un ou de plusieurs modes de défaillance.
- **Bilan de santé:** composé d'indicateurs auquel un index de santé est adjoint, permettant le suivi en continu, de l'état de dégradation et de la performance par rapport à une mission ou un contexte environnant.
- **Aide à la décision:** ensemble d'activités et d'outils concourant au choix des meilleures stratégies de maintenance selon des critères prédéfinis.

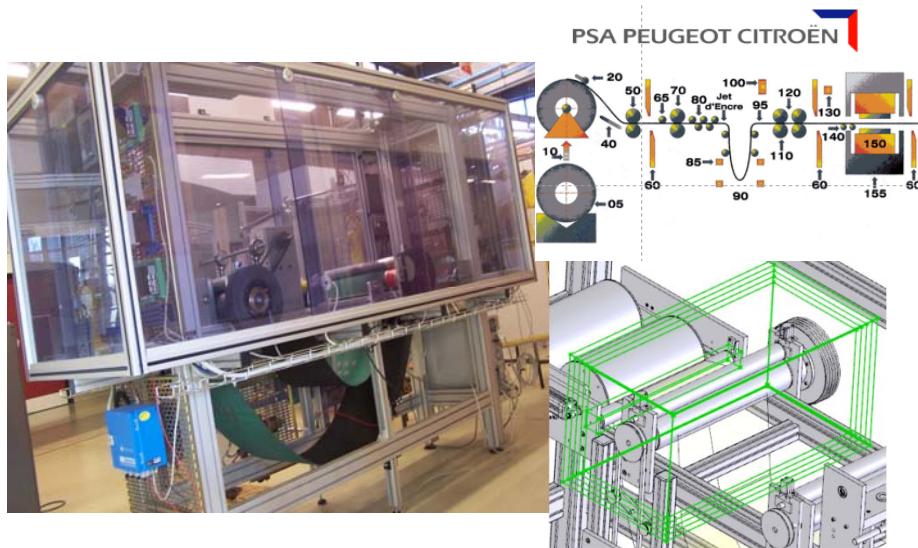
Quelques éléments clés ... Valorisation



Quelques éléments clés ... Thèses



Quelques éléments clés ... TELMA

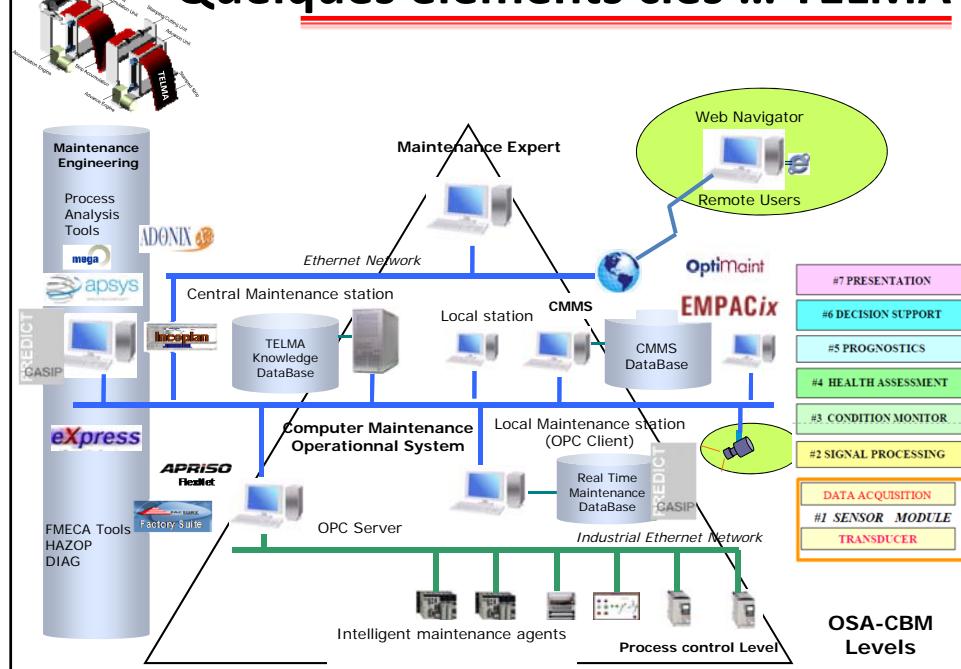


UMR
7039

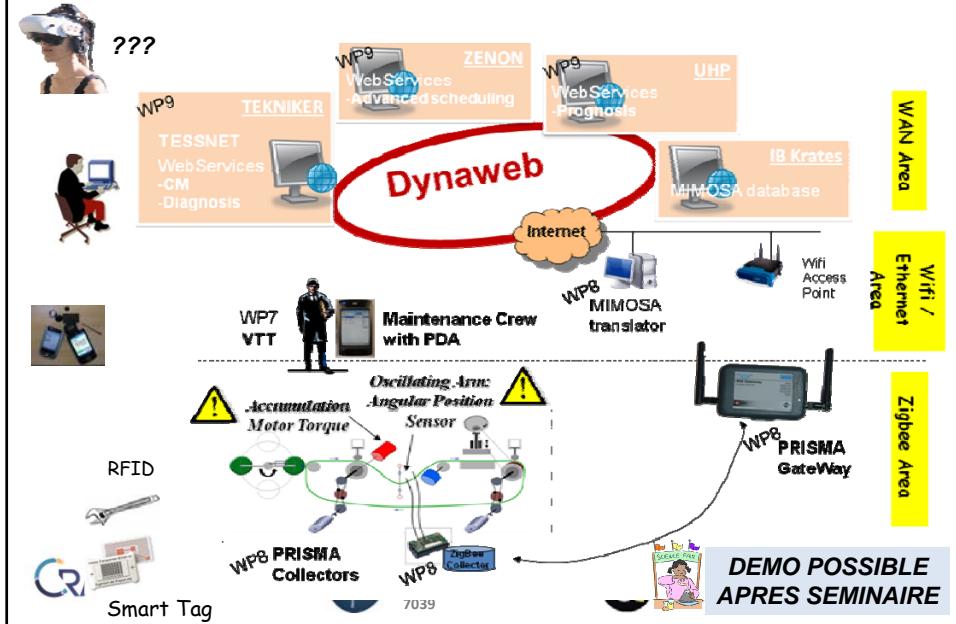


UNIVERSITÉ
DE LORRAINE

Quelques éléments clés ... TELMA

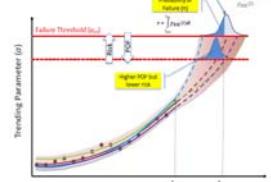


Quelques éléments clés ... TELMA



Le Pronostic ... de niveau composant

- Nécessité de faire coopérer plusieurs modèles à des niveaux différents :
 - Fonctionnel : finalité du composant
 - Etat : impact sur la « performance » i.e. finalité, associé au mode de dégradation (observation de la dégradation)
 - Dégradation : physique de la défaillance
 - Interactions entre les niveaux
 - Interaction avec l'environnement suivant le niveau
 - Les modèles de dégradation sont :
 - Continus → difficulté d'abstraction (niveau fonctionnel)
 - Discret → justification de la discréttisation de processus continus



Combine des aspects continus et discrets
Distribution de la RUL (simulation de Monte Carlo)
RUL représentatives d'un état fonctionnel

Calcul de RUL à partir de bilans de santé (des mesures)



The figure consists of two parts. The top part is a 2D matrix with 6 columns and 6 rows. The columns are labeled 'No. of Operation Cycles' (0 to 5) and the rows are labeled 'No. of New cycles' (0 to 5). The matrix contains numerical values representing expected indices. The bottom part is a line graph titled 'Time series of expected indices of the best matches'. The x-axis is 'No. of Operation Cycles' (0 to 10) and the y-axis is 'Index' (0 to 5). A blue line with circular markers shows the trend of the expected indices over time, starting at index 0 for cycle 0 and increasing to approximately index 4.5 at cycle 10. A purple arrow points from the matrix to the graph.



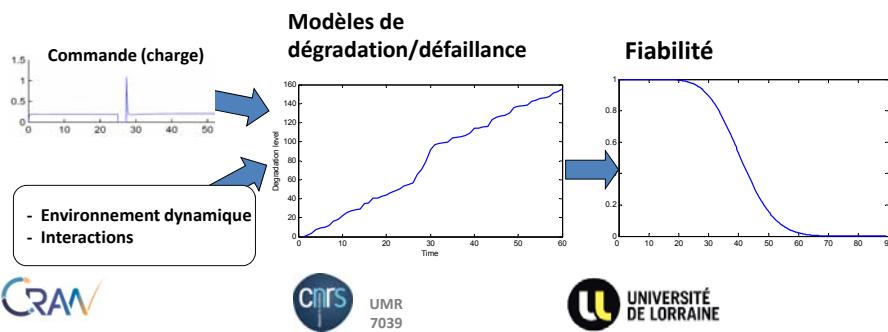
UMR
7039



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE

Le Pronostic ... de niveau composant

- Fiabilité/RUL dynamique en considérant
 - la charge/modes de fonctionnement, les conditions opérationnelles,...
 - les interactions avec d'autres composants
- Outils de modélisation utilisés
 - Processus stochastiques: Markov, Weibull, réseaux de Petri.
 - Modélisation de dégradation: Gamma, Markov, Wiener,..



Le Pronostic ... de niveau composant

- Modélisation par un processus stochastique: **modèle de COX**

Taux de défaillance d'un composant:

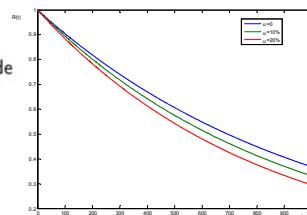
$$z(t, x) = z_0(t) \cdot g(x)$$

- $z_0(t)$: taux de défaillance en mode nominal du composant
- $g(x) = \exp(\sum_{i=1}^m \beta_i x_i) = \exp(\beta \mathbf{x})$, avec:
 - $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ vecteur des niveaux d'influence
 - $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)$ vecteur de coefficients

Exemple

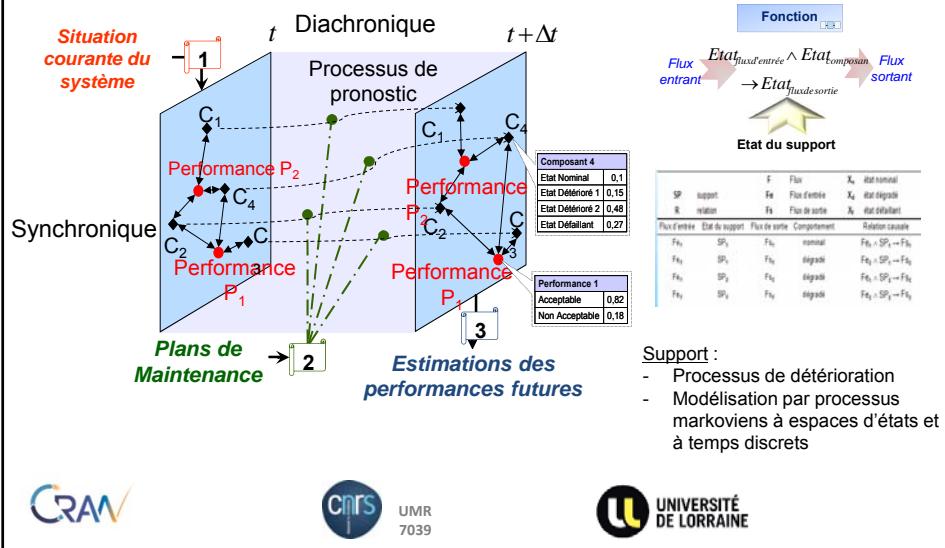
Considérons un composant dont son temps de défaillance en mode nominal suit une loi exponentielle

- Mode nominal: taux de défaillance $\lambda = 0.001$
- Mode surcharge de α %, taux de défaillance $\lambda' = \lambda \cdot \exp(\alpha)$



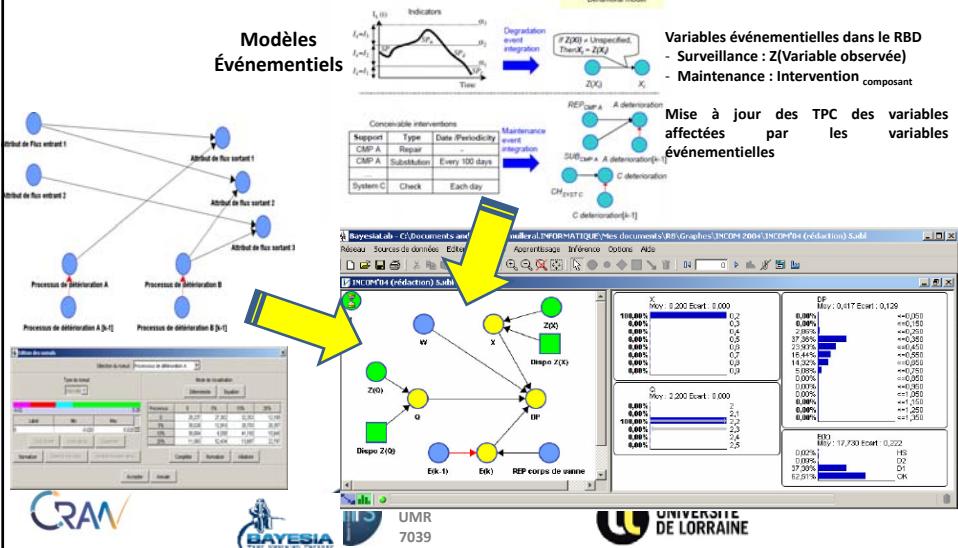
Le Pronostic ... de niveau système

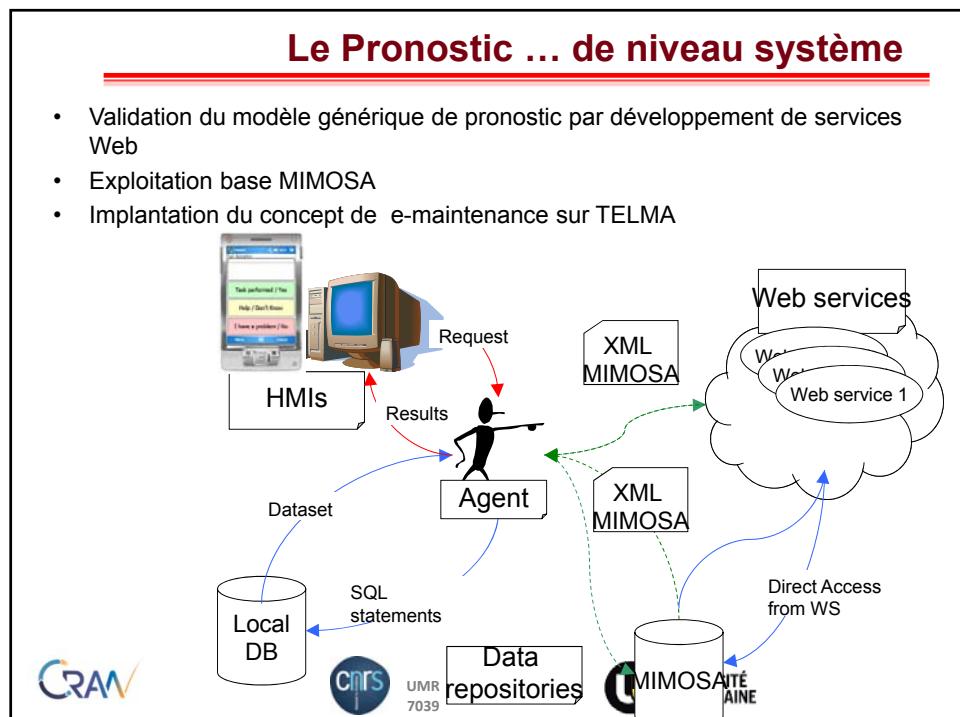
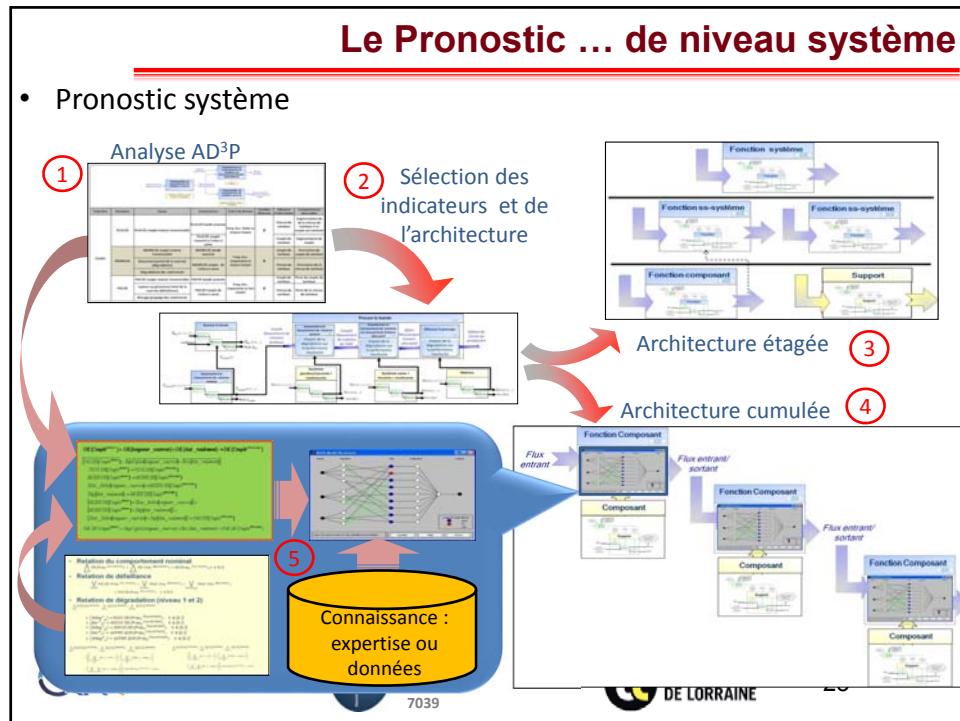
- Pronostic par couplage d'approche Probabiliste (RBD) et événementielle



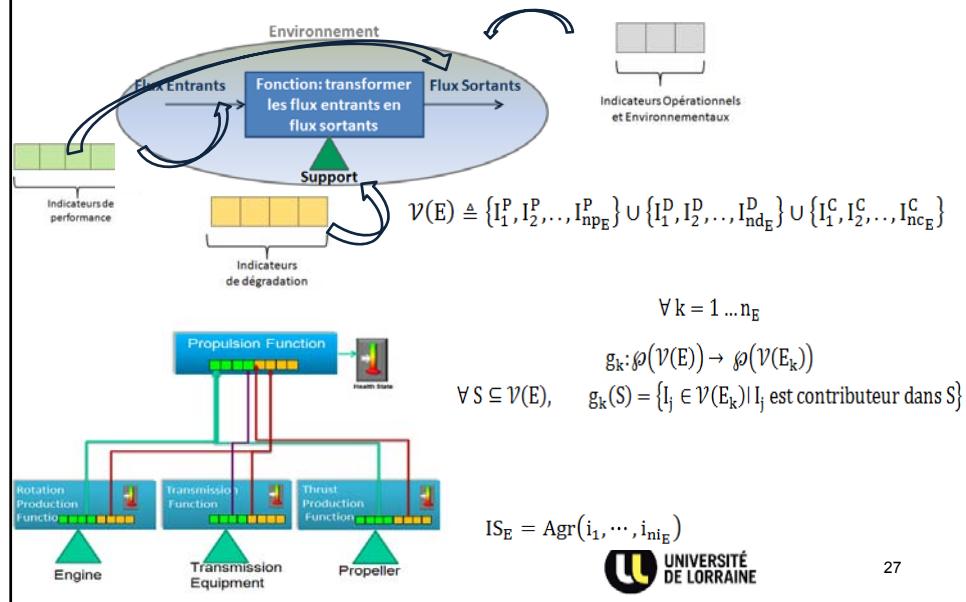
Le Pronostic ... de niveau système

- Pronostic par couplage d'approche Probabiliste (RBD) et événementielle

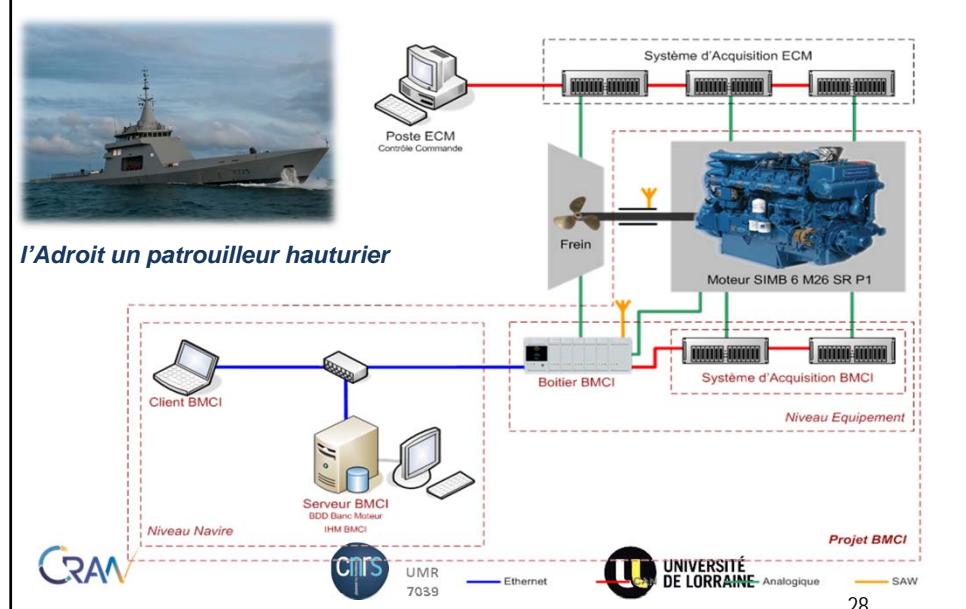




Agrégation d'indicateurs ... d'indexes pour le Health Assessment

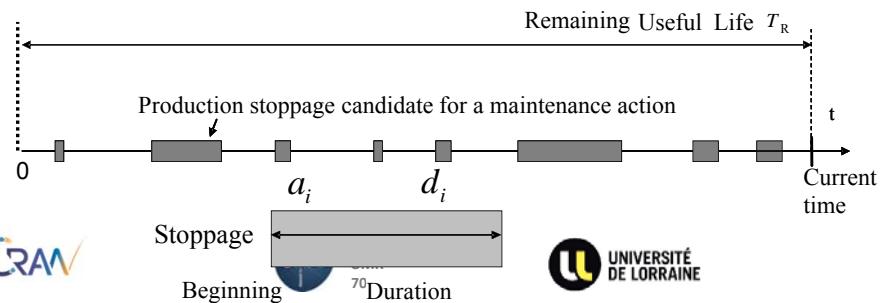


Agrégation d'indicateurs ... d'indexes pour le Health Assessment



Décision dynamique en maintenance

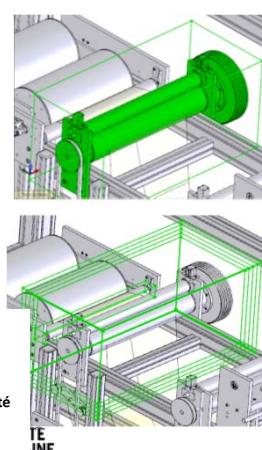
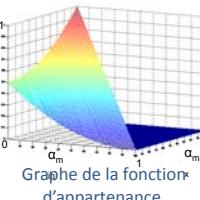
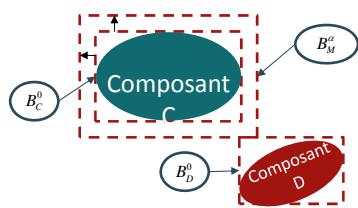
- Maintenance opportune support aux dépendances économiques
 - Première espèce : **synchronisation production–maintenance**
 - Seconde espèce : **regroupement de composants**
- Première espèce: le décideur peut-il sélectionner un arrêt de production pour effectuer une intervention de maintenance prévisionnelle et à minimiser l'impact sur la production?
 - Problématique de type arrêt optimal
 - succès = arrêt de production propice au développement d'une intervention de maintenance prévisionnelle
 - Utilisation du **théorème de Bruss** avec hypothèse des indépendances



Décision dynamique en maintenance

- Maintenance opportune support aux dépendances économiques
 - Première espèce : synchronisation production–maintenance
 - Seconde espèce : regroupement de composants
- les actions *C*-opportunes de seconde espèce privilégié les composants qui partagent avec *C* des propriétés communes (de proximité, de consignation, de finalité, d'outillage)
- ...

Concept de proximité : Principe des boîtes englobantes

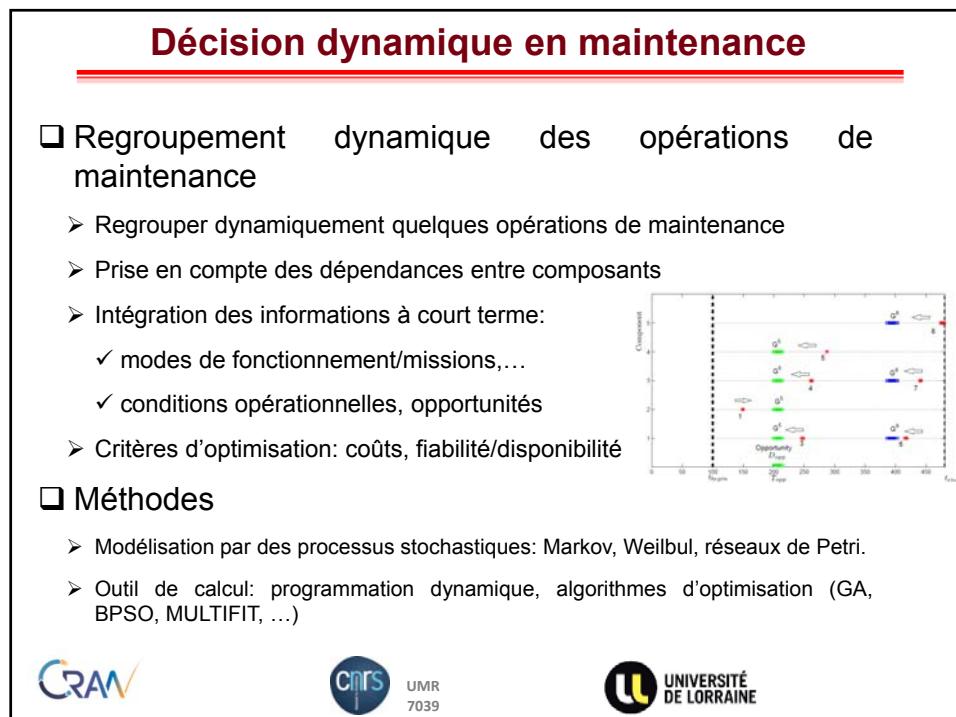
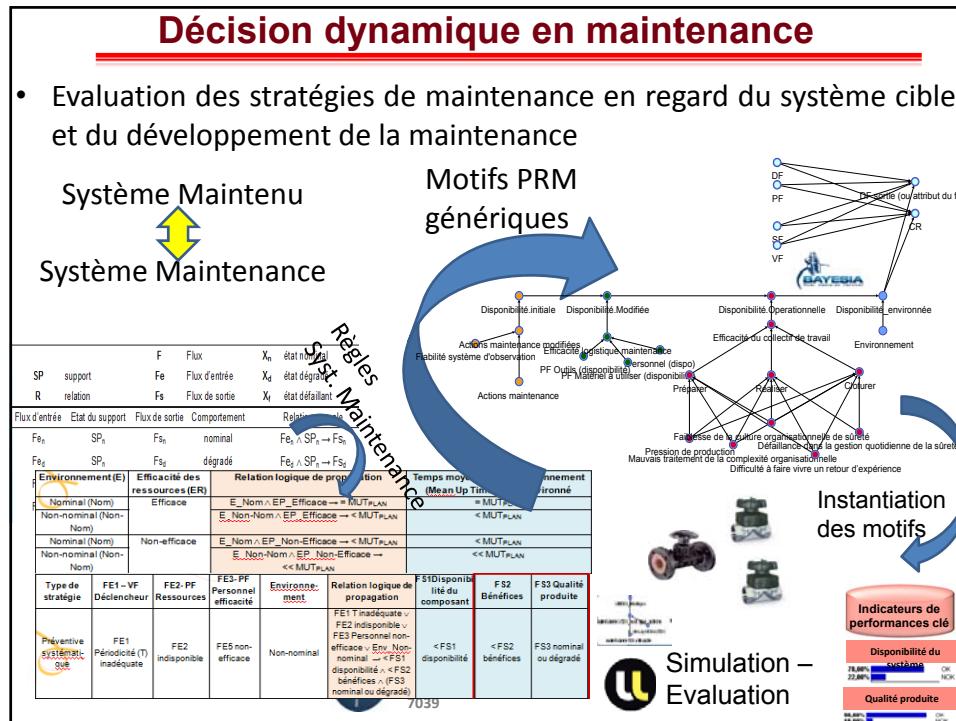


Mesure de proximité graduelle

$$\mu(C,D) = 1 - \frac{\alpha_{\max}^{C \rightarrow D}}{\delta} + \frac{1}{2} \frac{(\alpha_{\max}^{C \rightarrow D} - \alpha_{\min}^{C \rightarrow D})^2}{\delta^2},$$

δ est un coefficient de normalisation (diamètre du système...)

... vers une **masse d'opportunité maximale** par agrégation de propriétés



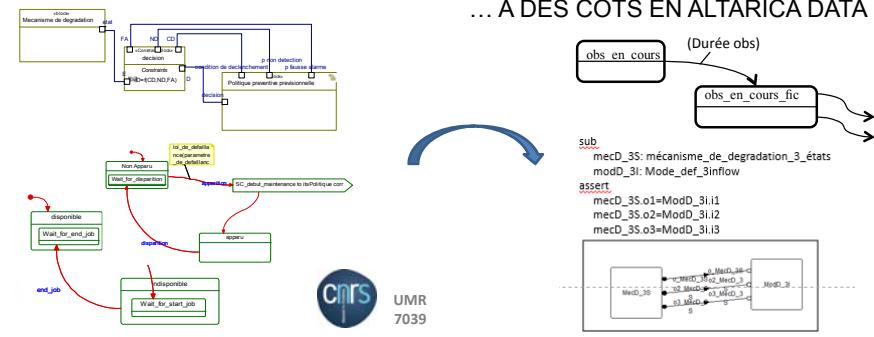
Quantification des programmes de maintenance

Generic View Dimension	Generic (Concepts on SoI and enabling systems in a model)	Specific (Specific SoI and enabling systems)
Structure	SysML-based (Rhapsody to o)	ABD based (SMIFIA to o)
Interaction	Parametric Diagram (PD)	Sequence Diagram (SD)
Behaviour	State Machine Diagram (SMD)	ABD atomic models
Execution	Language Transformation	Specify model to be simulated (SMIFIA to o)

DES DIAGRAMMES SYSML GENERIQUES ...

... A DES COTS EN ALTARICA DATA FLOW



UMR 7039

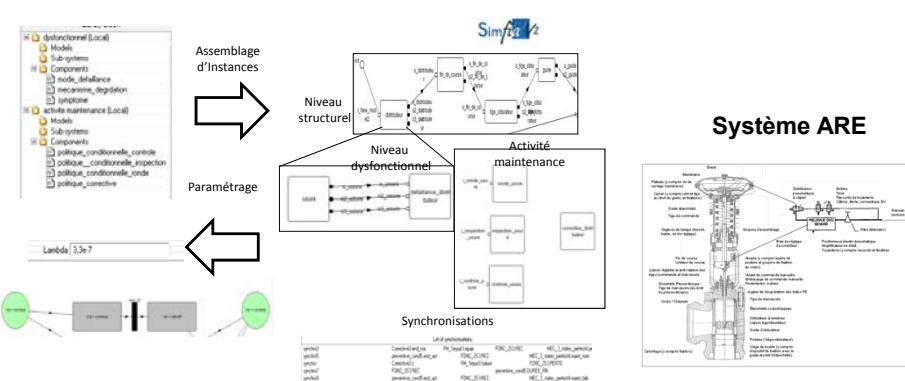
Quantification des programmes de maintenance

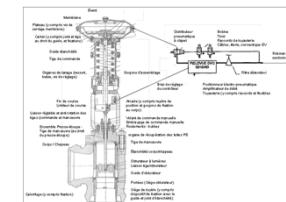
Assemblage d'Instances

Paramétrage

Indisponibilité du système ARE

Couts de maintenance du système ARE (€)



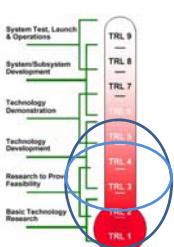




UMR 7039

La Maintenance Prédictive

De la Maintenance Prédictive au « Prognostics Health Management » (PHM)



Benoît IUNG
CRAN – Dept ISET
Benoit.iung@univ-lorraine.fr

CRAN CENTRE DE RECHERCHE EN AUTOMATIQUE DE NANCY

CNRS UMR 7039

Université de Lorraine

primeca