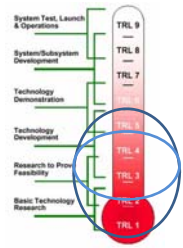


La Maintenance Prédictive


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



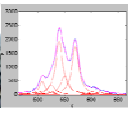



UMR 7039

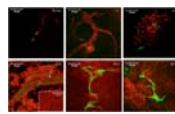



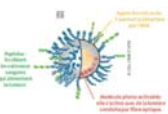
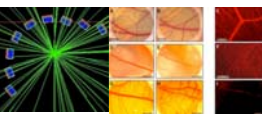
Avant Propos: le CRAN




- 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








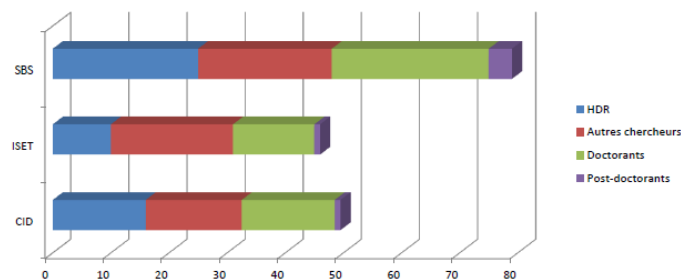
UMR 7039



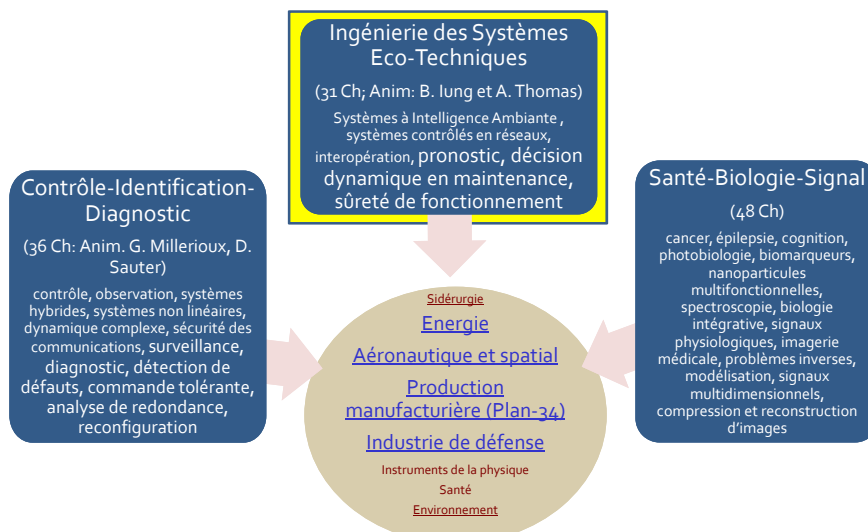
Avant Propos: le CRAN

215 personnes

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



Avant Propos: le CRAN



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

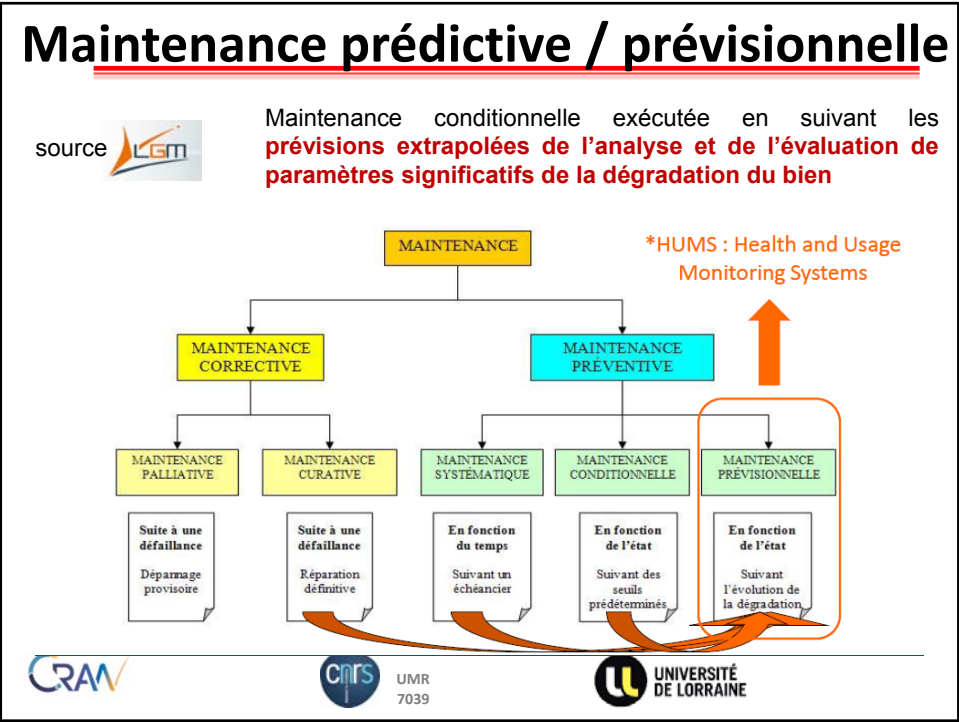
- Fondés les principes d'une **maintenance prévisionnelle**
- Développement de méthodes et techniques de modélisation **de la prise de décision dynamique en maintenance** principalement sur la base d'un processus formalisé de **pronostic**
- **Dualité décision/action** (décision vis-à-vis des performances – 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



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



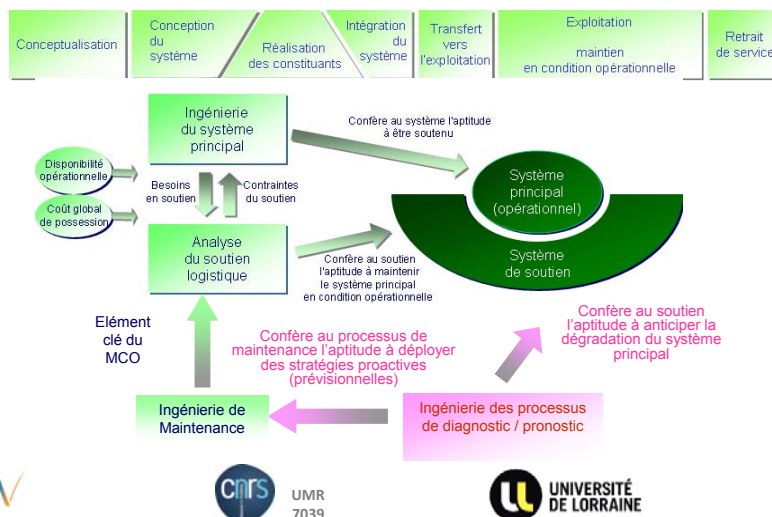
Orientation CRAN en maintenance prévisionnelle

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 & DISTRIBUEE** 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)



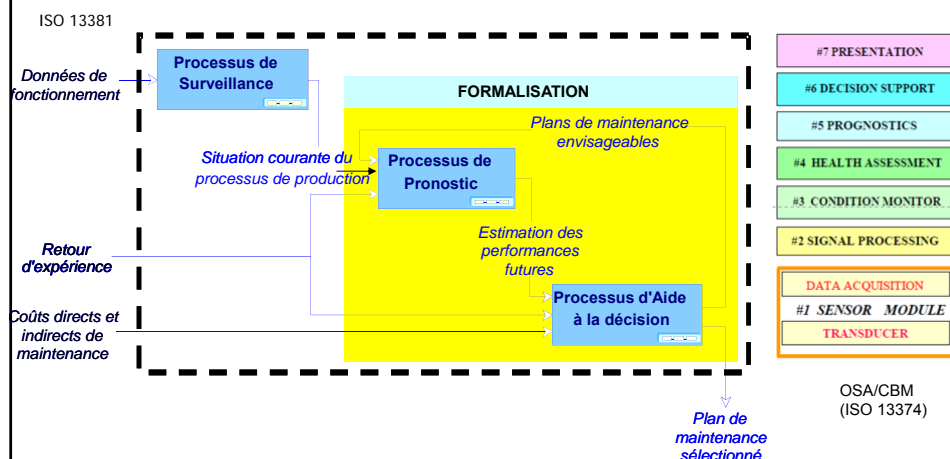
Orientation CRAN en maintenance prévisionnelle

- Ingénierie Système – Ingénierie du Soutien; Cycle de Vie; Pronostic



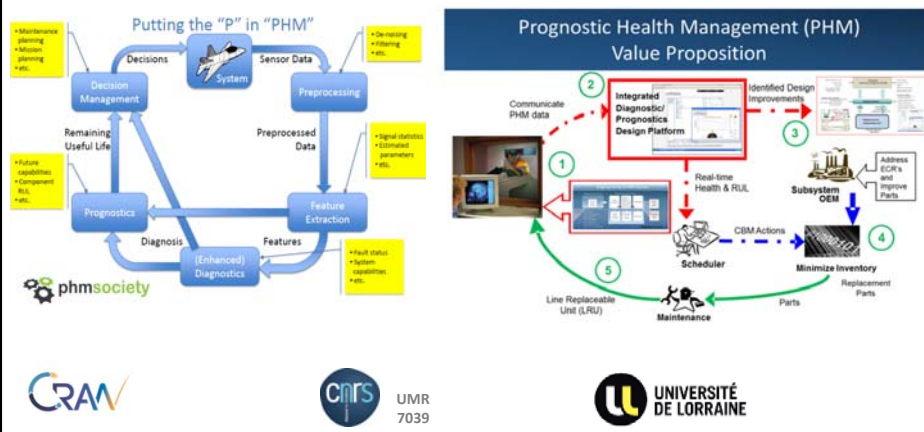
Orientation CRAN en maintenance prévisionnelle

- Processus clés de la maintenance prévisionnelle



Du prévisionnel au PHM ... IVHM

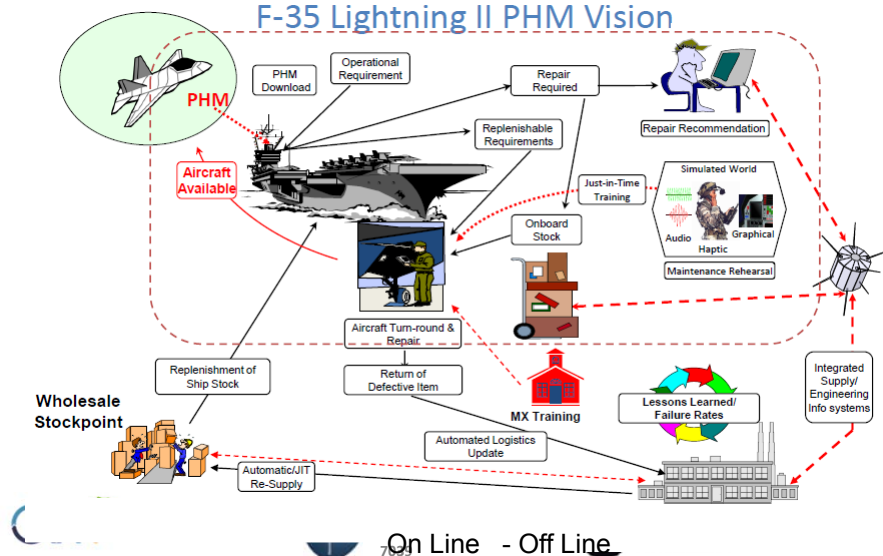
Le PHM est une « philosophie » émergente qui étend la notion de maintenance prévisionnelle par l'optimisation de la maintenance et la logistique de soutien afin d'accroître la disponibilité opérationnelle et réduire le « Life-Cycle Cost » tout en augmentant potentiellement la fiabilité et l'espérance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



Du prévisionnel au PHM ... IVHM

CBM+

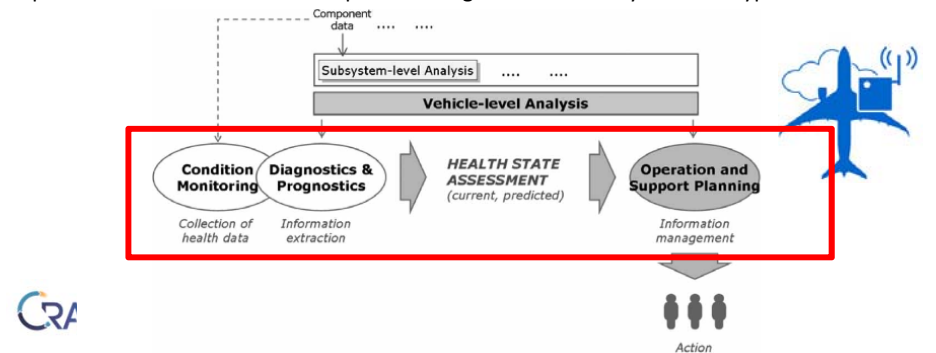
F-35 Lightning II PHM Vision



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.



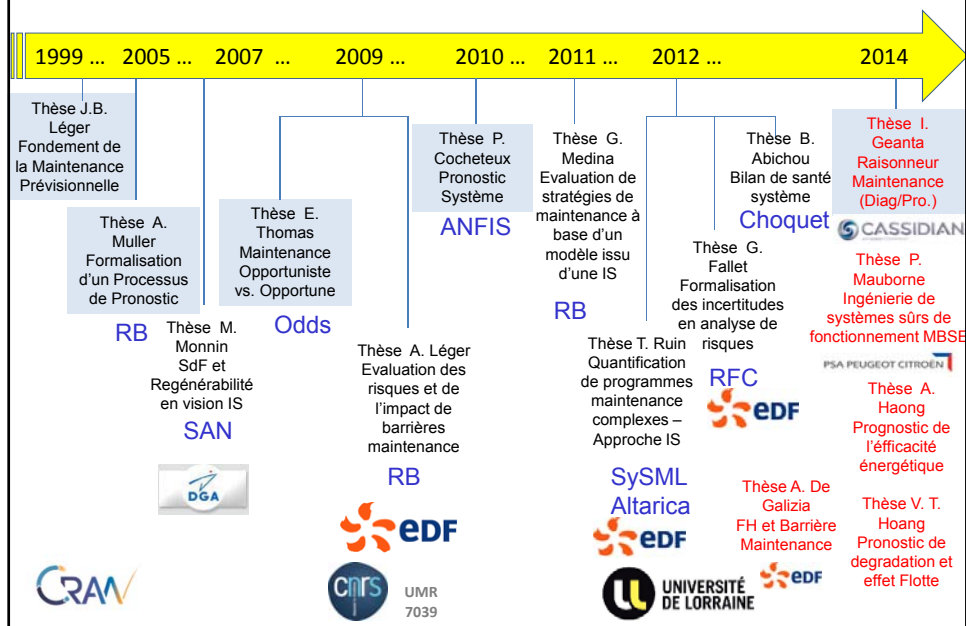
Du prévisionnel au PHM ... IVHM

- **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.

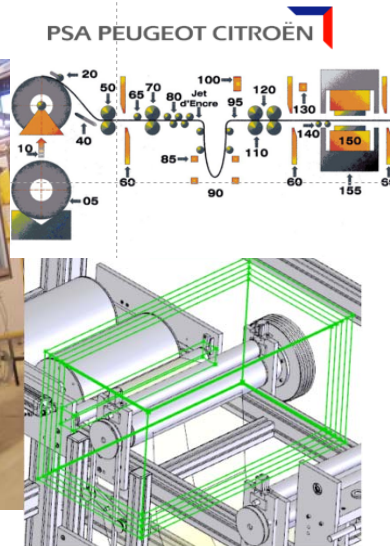
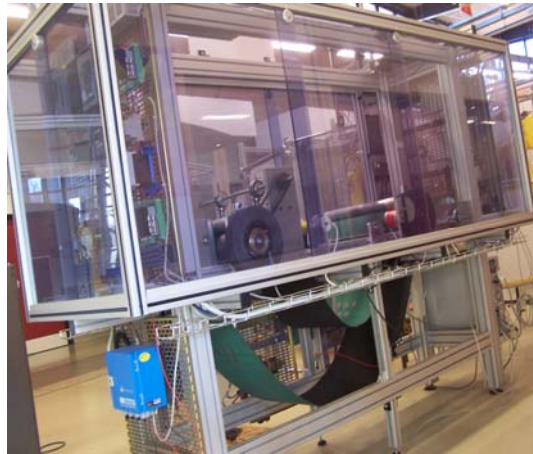
Quelques éléments clés ... Valorisation



Quelques éléments clés ... Thèses



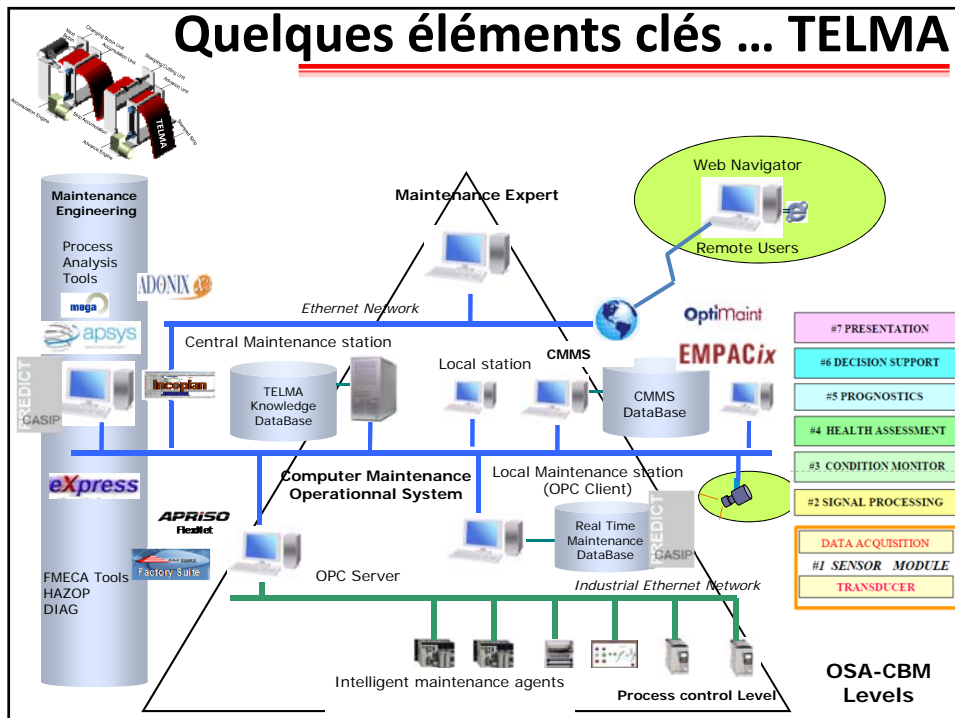
Quelques éléments clés ... TELMA



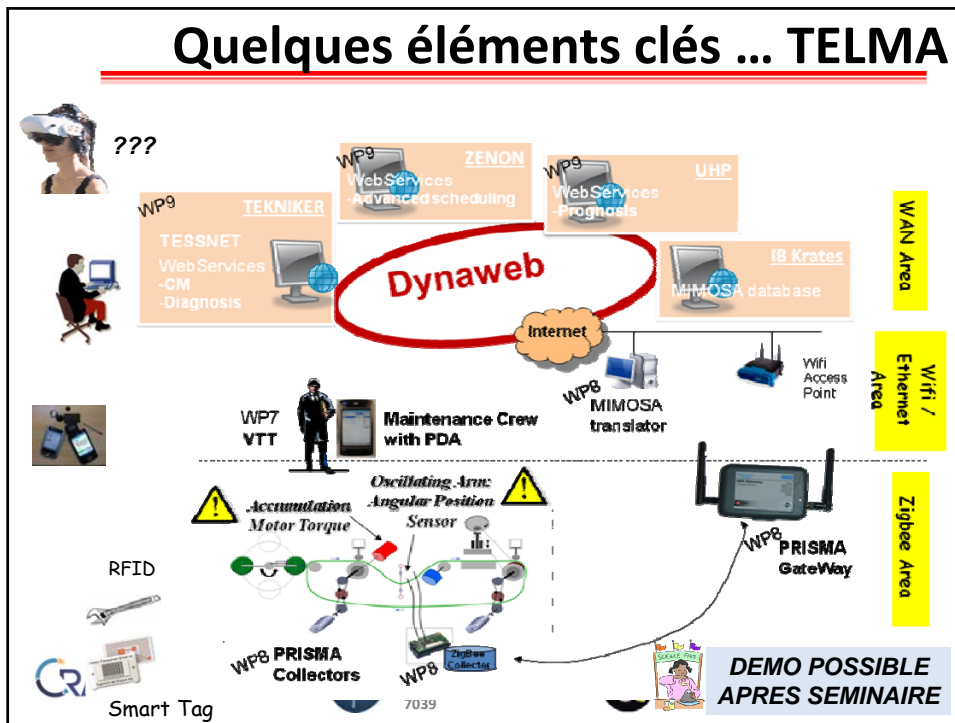
UMR
7039



Quelques éléments clés ... TELMA

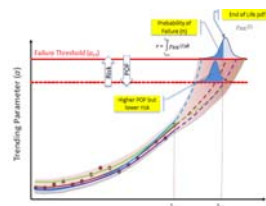


Quelques éléments clés ... TELMA



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 :
 - Continu \rightarrow difficulté d'abstraction (niveau fonctionnel)
 - Discret \rightarrow justification de la discrétisation de processus continus



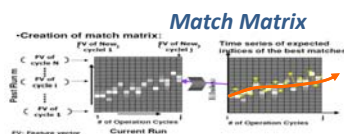
Stochastic Activity Network



- 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)
RUL représentatives de la dégradation

RUL représentatives de la dégradation



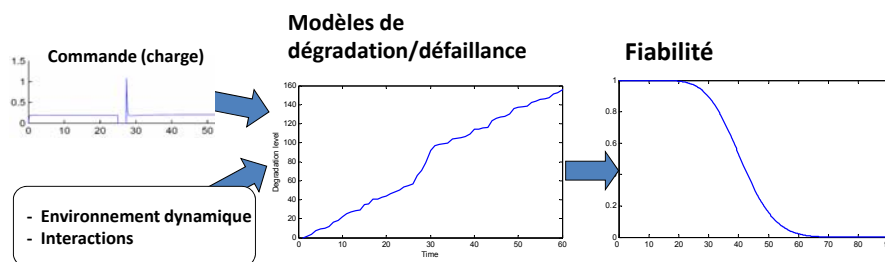
Le Pronostic ... de niveau composant

❑ 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, ..



UMR
7039



Le Pronostic ... de niveau composant

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

Taux de défaillance d'un composant:

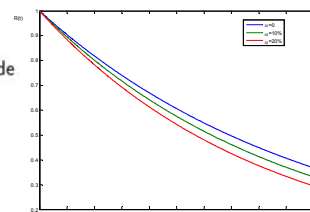
$$z(t, x) = z_0(t) \cdot g(x)$$

- $z_0(t)$: taux de défaillance en mode nominal du composant
- $g(x) = \exp(\sum_{i=1}^m \beta_i x_i) = \exp(\beta x)$, avec:
 - $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ 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 $\lambda' = \lambda \cdot \exp(\alpha)$

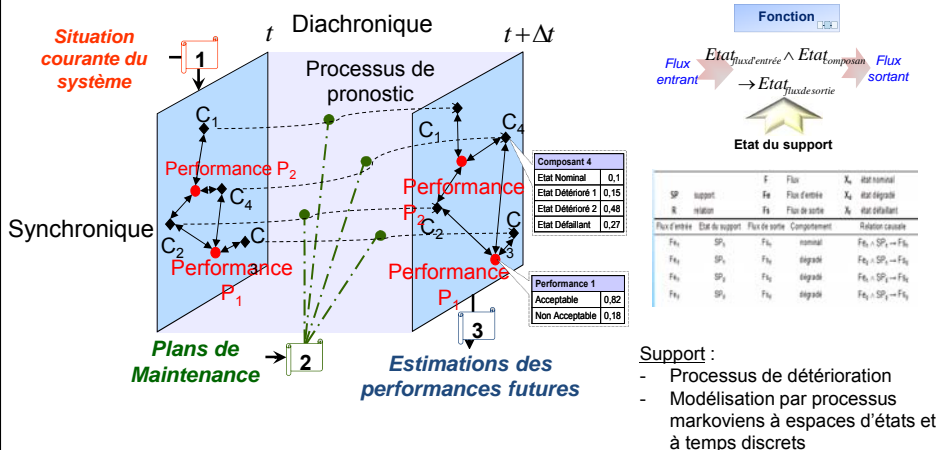


UMR
7039



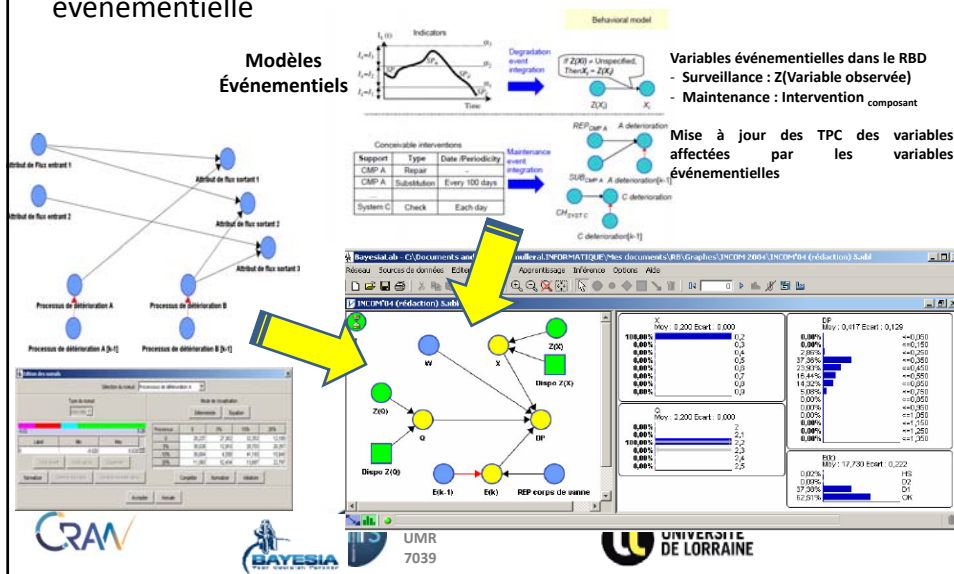
Le Pronostic ... de niveau système

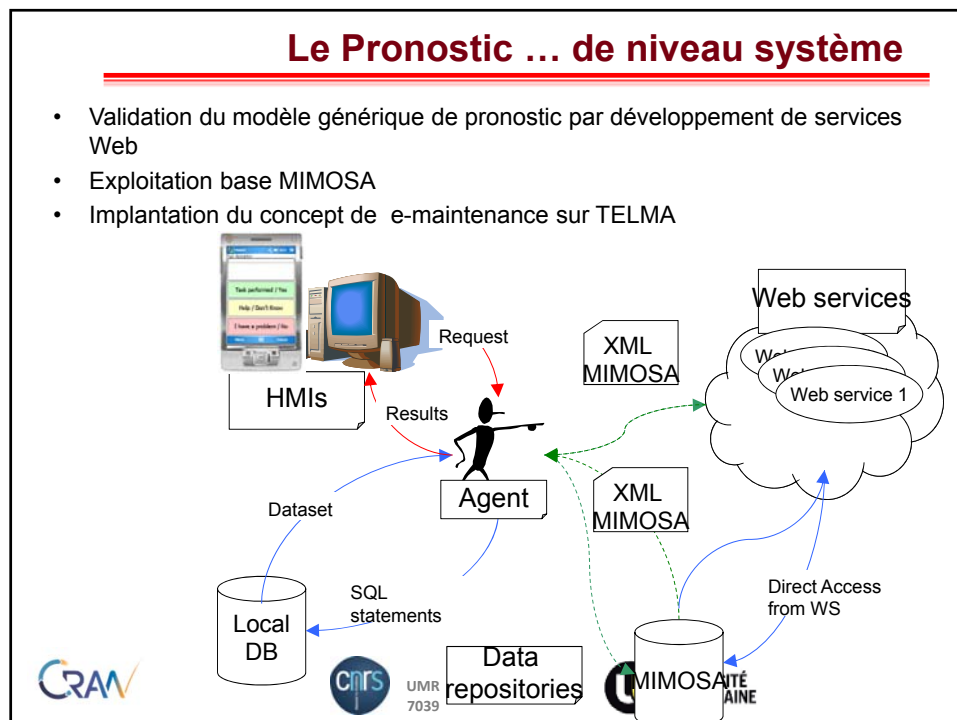
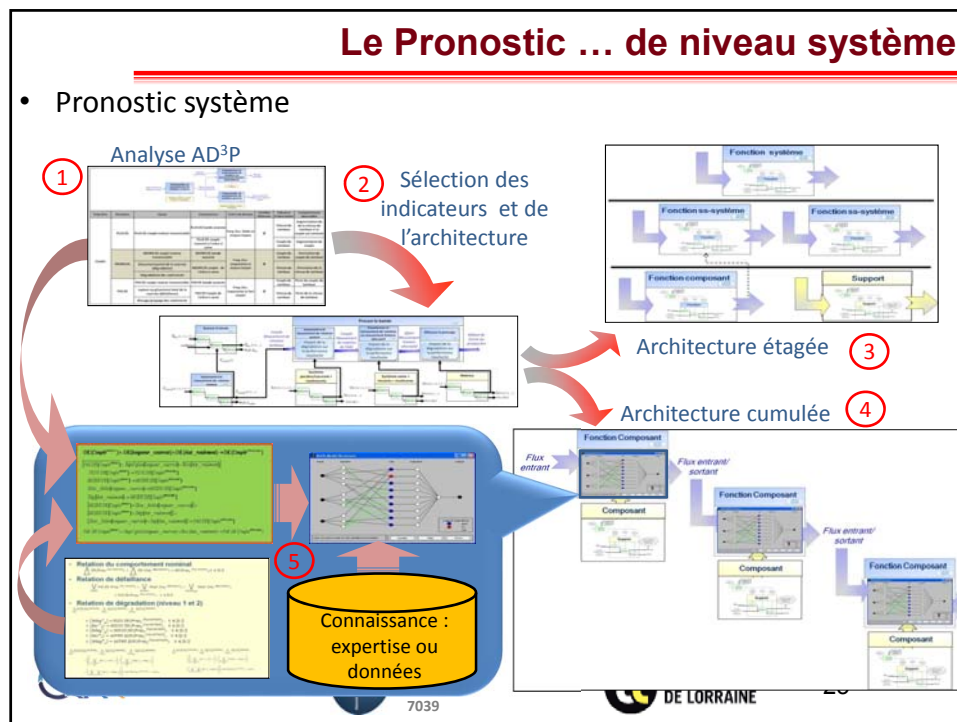
- Pronostic par couplage d'approche Probabiliste (RBD) et événementielle

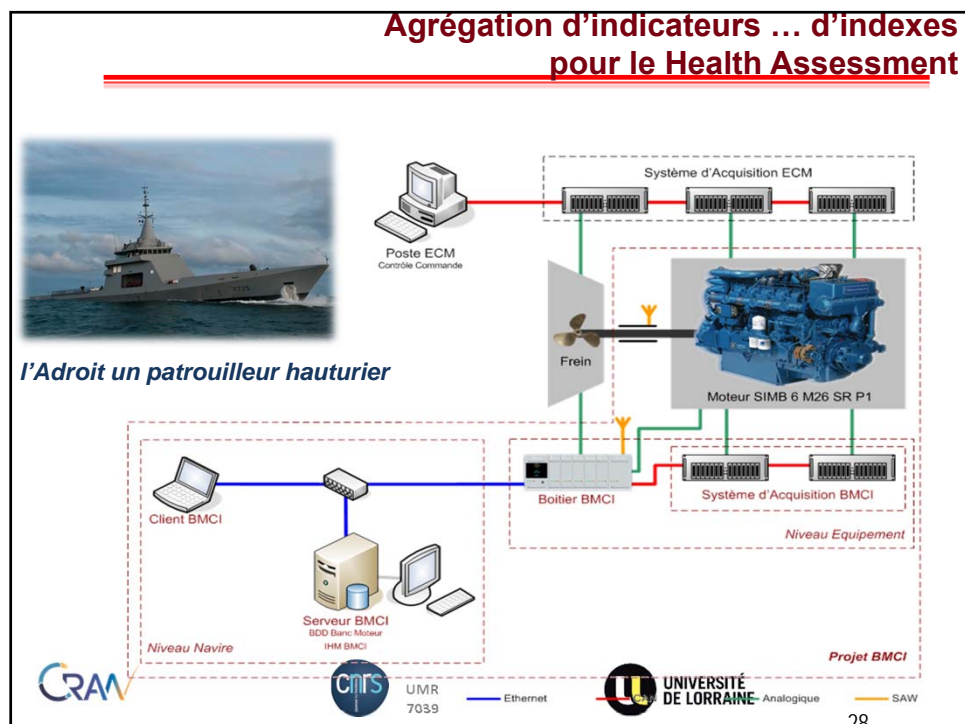
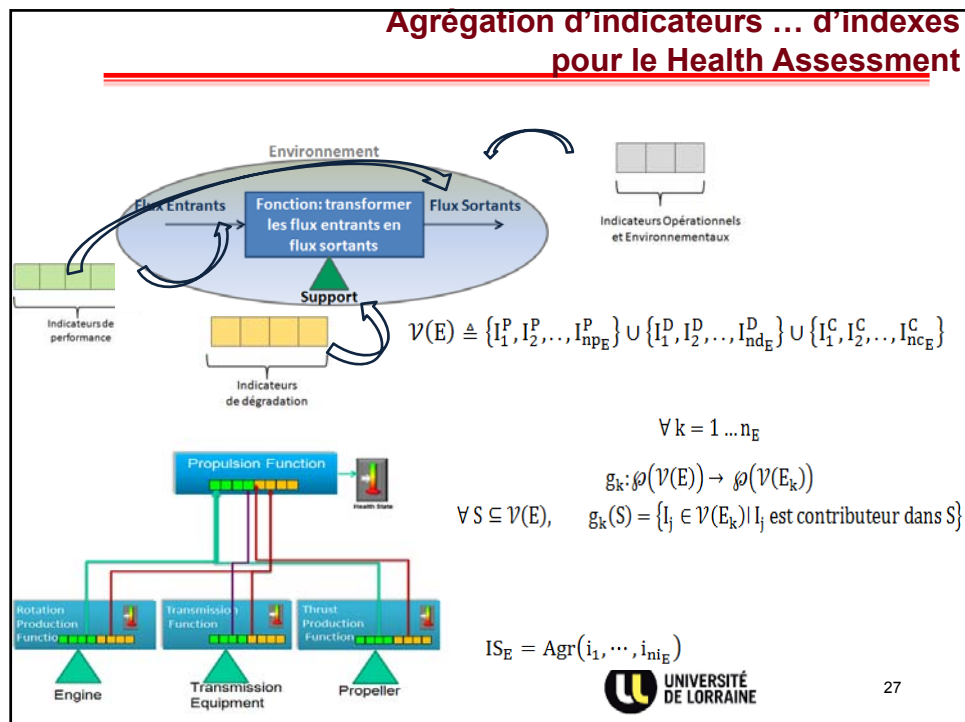


Le Pronostic ... de niveau système

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

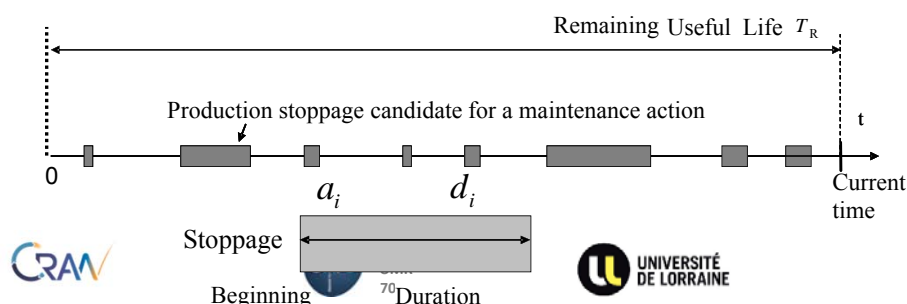






Décision dynamique en maintenance

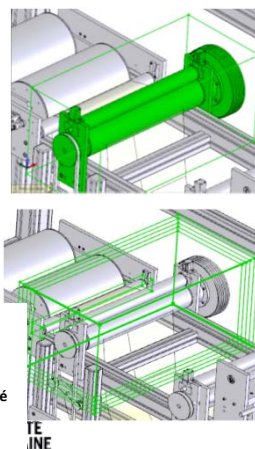
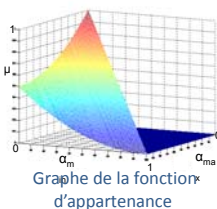
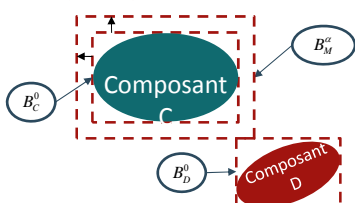
- Maintenance opportune support aux dépendances économiques
 - Première espèce : **synchronisation production–maintenance**
 - Seconde espèce : **regroupement de composants**
- Première espèce: le décideur peut-il sélectionner un arrêt de production pour effectuer une intervention de maintenance prévisionnelle 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 privilégient 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

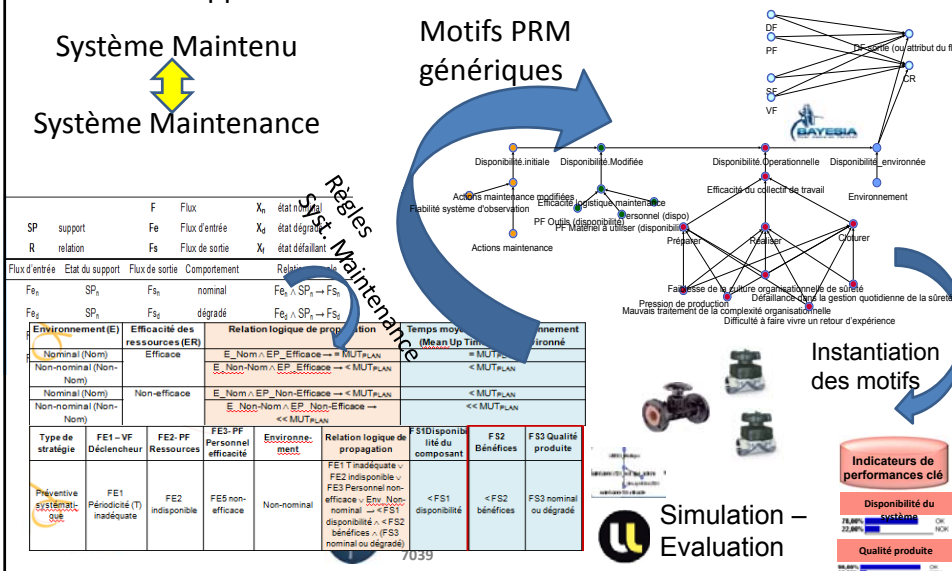
$$\mu(C, D) = 1 - \frac{\alpha_{\max}^{C \rightarrow D}}{\delta} + \frac{1}{2} \frac{(\alpha_{\max}^{C \rightarrow D} - \alpha_{\min}^{C \rightarrow D})^2}{\delta^2},$$

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

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

Décision dynamique en maintenance

- Evaluation des stratégies de maintenance en regard du système cible et du développement de la maintenance



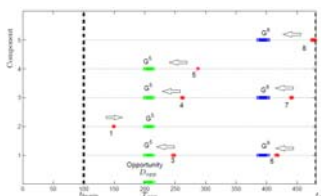
Décision dynamique en maintenance

Regroupement dynamique des opérations de maintenance

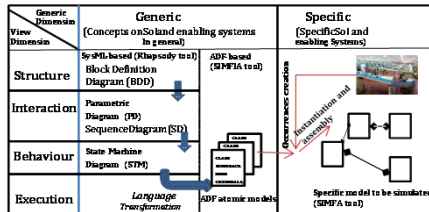
- Regrouper dynamiquement quelques opérations de maintenance
- Prise en compte des dépendances entre composants
- Intégration des informations à court terme:
 - ✓ modes de fonctionnement/missions,...
 - ✓ conditions opérationnelles, opportunités
- Critères d'optimisation: coûts, fiabilité/disponibilité

Méthodes

- Modélisation par des processus stochastiques: Markov, Weibul, réseaux de Petri.
- Outil de calcul: programmation dynamique, algorithmes d'optimisation (GA, BPSO, MULTIFIT, ...)

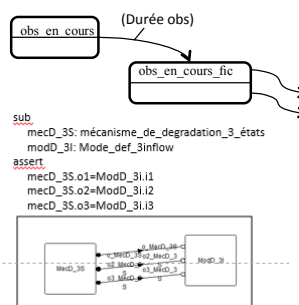
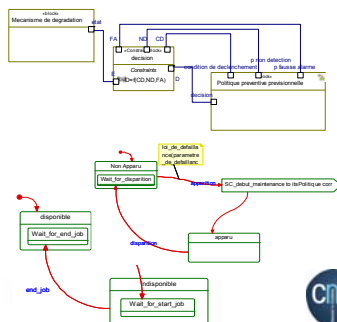


Quantification des programmes de maintenance



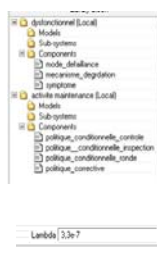
DES DIAGRAMMES SYSML GENERIQUES ...

... A DES COTS EN ALTARICA DATA FLOW



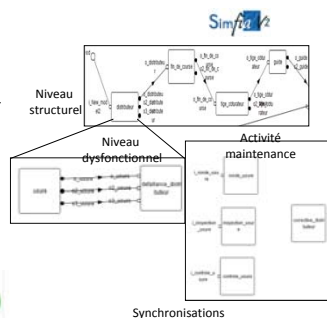
UMR 7039

Quantification des programmes de maintenance

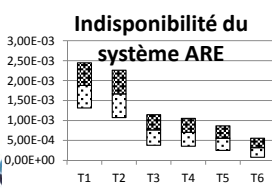
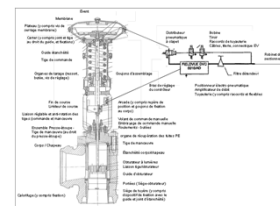


Assemblage d'Instances

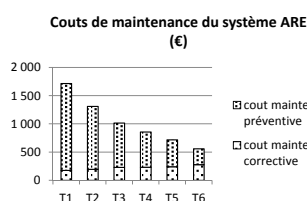
Paramétrage



Système ARE




UMR 7039



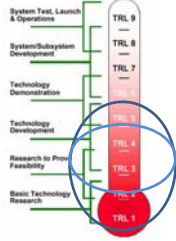
☒ cout maintenance préventive
☐ cout maintenance corrective





La Maintenance Prédictive

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



Benoît IUNG

CRAN – Dept ISET

Benoit.iung@univ-lorraine.fr

