



Modélisation du démantèlement des systèmes complexes.

Application à l'aéronautique

François Pérès
Eric Villeneuve
Matthieu Godichaud

Journées de l'Automatique
Grenoble 5 octobre 2016



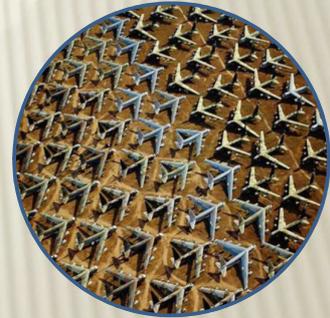
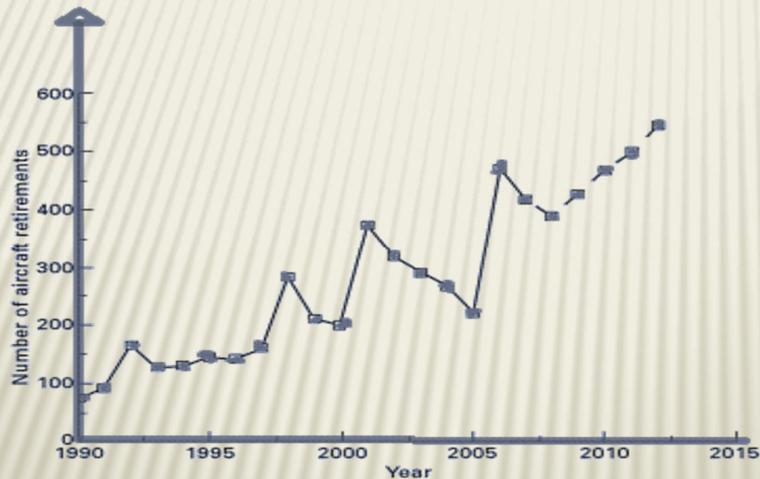
LE DÉMANTÈLEMENT AÉRONAUTIQUE

- **Problématique industrielle importante**
 - + **intégration des exigences environnementales**
 - × prise en compte des contraintes de développement durable ;
 - + **valeur résiduelle des pièces et matériaux extraits des appareils :**
 - × alternative à la production de pièces neuves (vue fournisseur)
 - × pièces de rechanges moins chères (vue client) ;
 - + **capitalisation de connaissances induisant des actions**
 - × de reconception
 - × d'adaptation des modes d'exploitation
 - × de modification des stratégies de maintenance de l'appareil.



EVOLUTION DU NOMBRE D'AVION EN FIN DE VIE

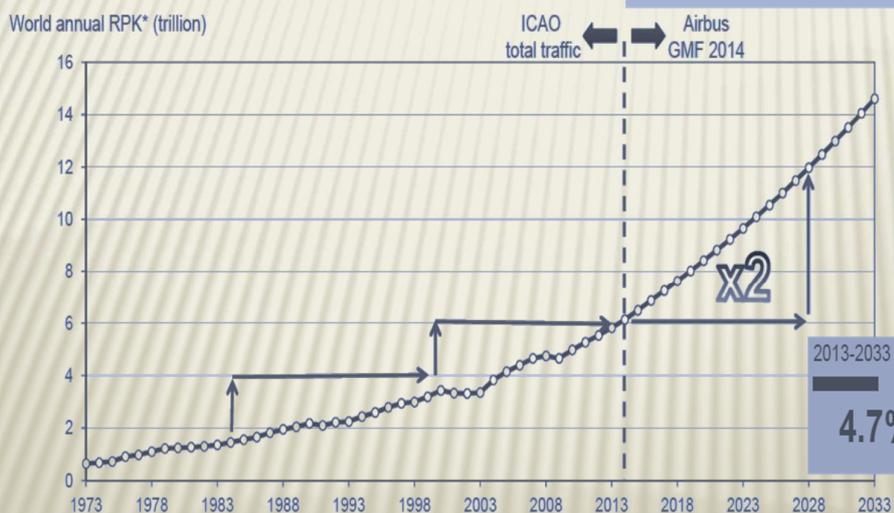
➤ Evolution du nombre d'avion en fin de vie



- Entre **6000** et **12000** avions commerciaux hors d'usage d'ici 2030
- **300 à 500** appareils en fin de vie à déconstruire chaque année
- Baisse de la durée de vie moyenne des avions commerciaux de **31 à 26 ans**

TENDANCES

➤ Doublement du trafic aérien dans les 15 prochaines années



Source: ICAO, Airbus GMF 2014

LES SITES FRANÇAIS

2 sites de démantèlement en France:

+ **Bartín**
Châteauroux-Centre (Indre) depuis 2005

+ **Tarmac Aerosave**
Tarbes (Pyrénées)

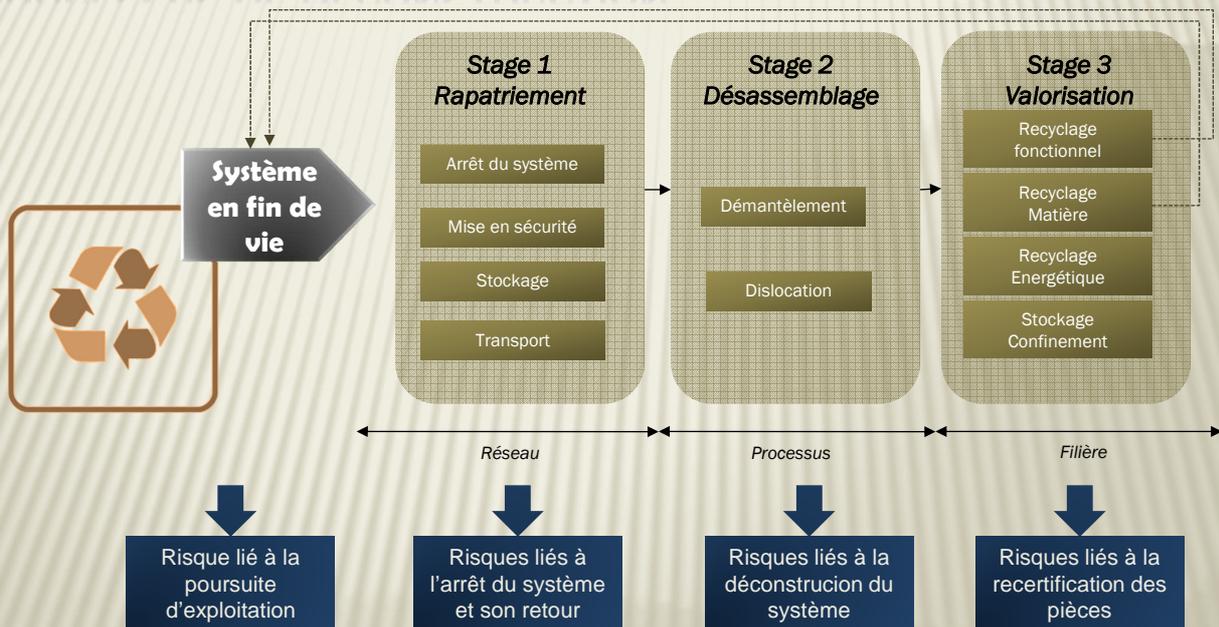
Sites spécialisés :

+ **dépollution et déconstruction**
d'avions hors d'usage

+ stockage des appareils et **maintenance** associée permettant de maintenir ces avions en condition de vol.



PROCESSUS DE DÉCONSTRUCTION



Management des risques pour la revalorisation des systems en fin de vie

PROBLÉMATIQUES TRAITÉES

- **Choix du site de rapatriement des avions en fin de vie** ➔ (thèse Yasmina Bouzarour)
- **Développement d'une unité de pré-démantèlement mobile** ➔ (Projet CLEAN)
- **Evaluation du risque lié à la réutilisation de pièces issues du démantèlement**
- **Choix de la profondeur de déconstruction**

Thèse (M. Godichaud)



Démantèlement aéronautique

Choix de la profondeur de déconstruction

Thèse (E. Villeneuve)



Démantèlement aéronautique

Evaluation du risque lié à la réutilisation de pièces issues du démantèlement

7



Modélisation du démantèlement des systèmes complexes.

Choix de la profondeur de déconstruction



Journées de l'Automatique
Grenoble 5 octobre 2016



PROBLÉMATIQUE

7

- ⇒ Définition et optimisation de trajectoires de déconstruction des système en fin de vie :
 - + Caractérisation des différents **constituants** :
 - × composants élémentaires,
 - × sous-ensembles,
 - × fragments de matière
 - + Identification des **options de déconstruction** :
 - × Opérations de désassemblage
 - × Actions de valorisation
 - * Fonctionnelle
 - * Matière
 - * Energétique
 - * Confinement
 - + Définition des variables de décision
 - × Associées à chaque option, elles caractérisent la sélection ou non de cette option
 - + Choix de la solution optimale sur la base de différents critères :
 - × **profit économique,**
 - × **taux de valorisation,**
 - × **bilan écologique**

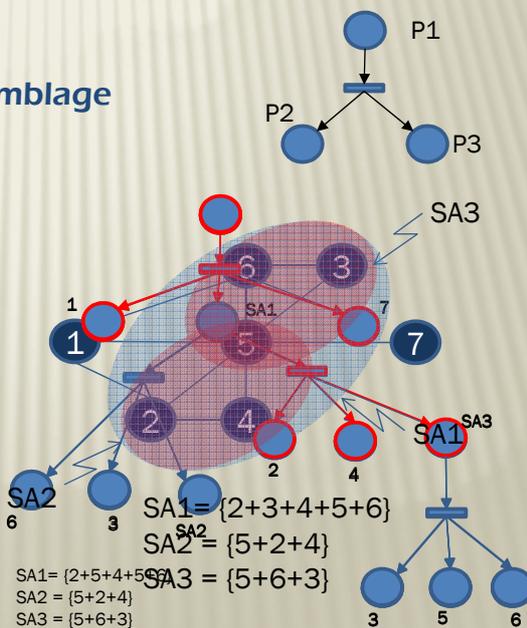
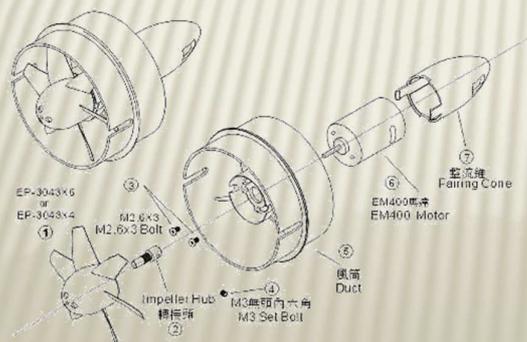


PROFONDEUR DE DÉSASSEMBLAGE

⇒ Representation : Réseau de Petri

- + Places = produit à valoriser
- + Transitions = Opérations de désassemblage

⇒ Exemple:



CONTEXTE INCERTAIN

Sources d'incertitudes dans le processus de désassemblage :

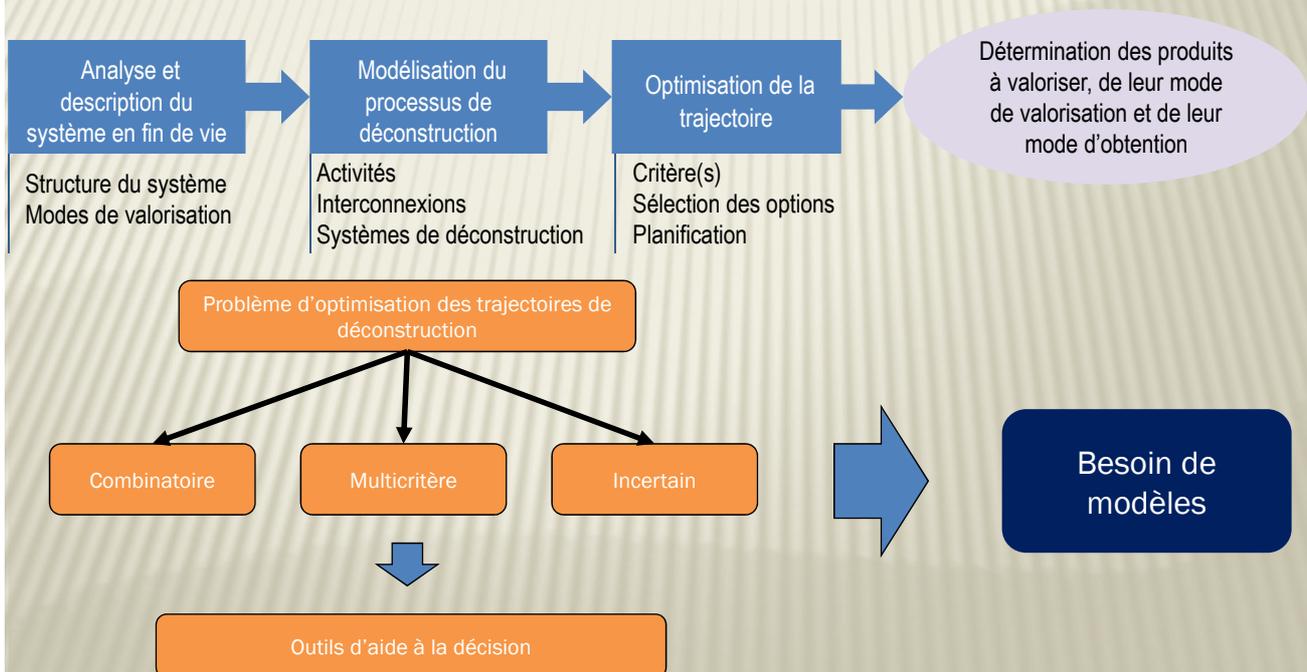
- + **Etat du produit**
 - × Usagé
 - × Abîmé
 - × Incomplet
- + **Disponibilité des ressources**
 - × Personnel
 - × Outillages
 - × Places de stockage
- + **Arrivée de systèmes en fin de vie**
 - × Nature
 - × Rythme
- + **Demande de pièces**
 - × Nature
 - × Quantité



11

PROBLÉMATIQUE

Démarche de définition



RÉSEAU BAYESIEN

↳ Modèle

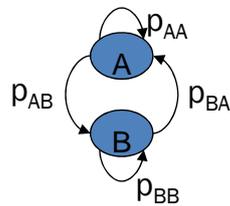
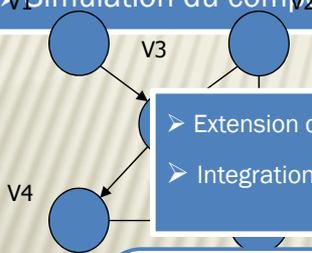
+ Réseau Bayesien

- Représentation graphique de la connaissance
- Prise en compte de divers facteurs aléatoires
- Facilité de réglage des paramètres
- Simulation du comportement

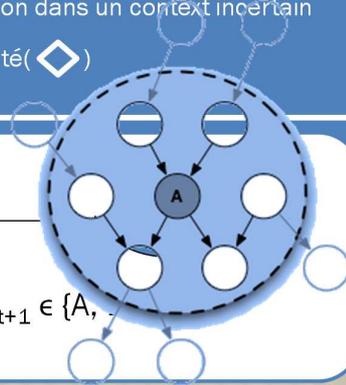
➤ *modèle graphique probabiliste représentant un ensemble de variables aléatoires et leurs indépendances conditionnelles*

➤ un réseau bayésien est défini par deux éléments :

- Extension des RB pour représenter les problèmes de décision dans un contexte incertain
- Intégration de noeuds de décision (□) et de noeuds d'utilité (◇)



$S_t, S_{t+1} \in \{A, B\}$



STRATÉGIES DE DÉSASSEMBLAGE

↳ Décision stratégique

- + **prédictive**
- + **réactive**

↳ Gestion des 2 types de décision par Diagrammes d'Influence

- + Traitement sans connaissance a priori
 - × Recherche d'une **séquence optimale de désassemblage**

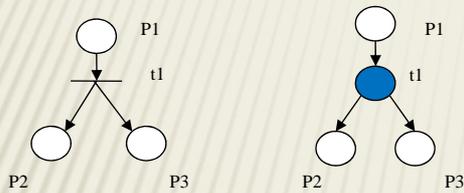
- + Intégration et **propagation d'une connaissance**

- × Le processus de désassemblage a démarré
- × Une opération de désassemblage a échoué
- × Recherche d'une nouvelle séquence





DIAGRAMME D'INFLUENCE



(a) Conversion d'un RdP en RB

15



EVALUATION DES SOLUTIONS DE DÉCONSTRUCTION

⇒ Noeuds d'évaluation:

- + Noeuds associés aux coûts de désassemblage
 - × Reliés aux noeuds d'opérations de désassemblage,
 - × Fonction de la réalisation de l'opération de désassemblage,
- + Noeuds associés aux coûts de recyclage
 - × Pour l'évaluation de chaque action de recyclage
- + Noeuds associés aux gains issus du recyclage
 - × Bénéfice résultant de la mise en oeuvre de l'action de revalorisation.

Operation	
na	0
t1	50.0
t2	30.0
ar	20.0

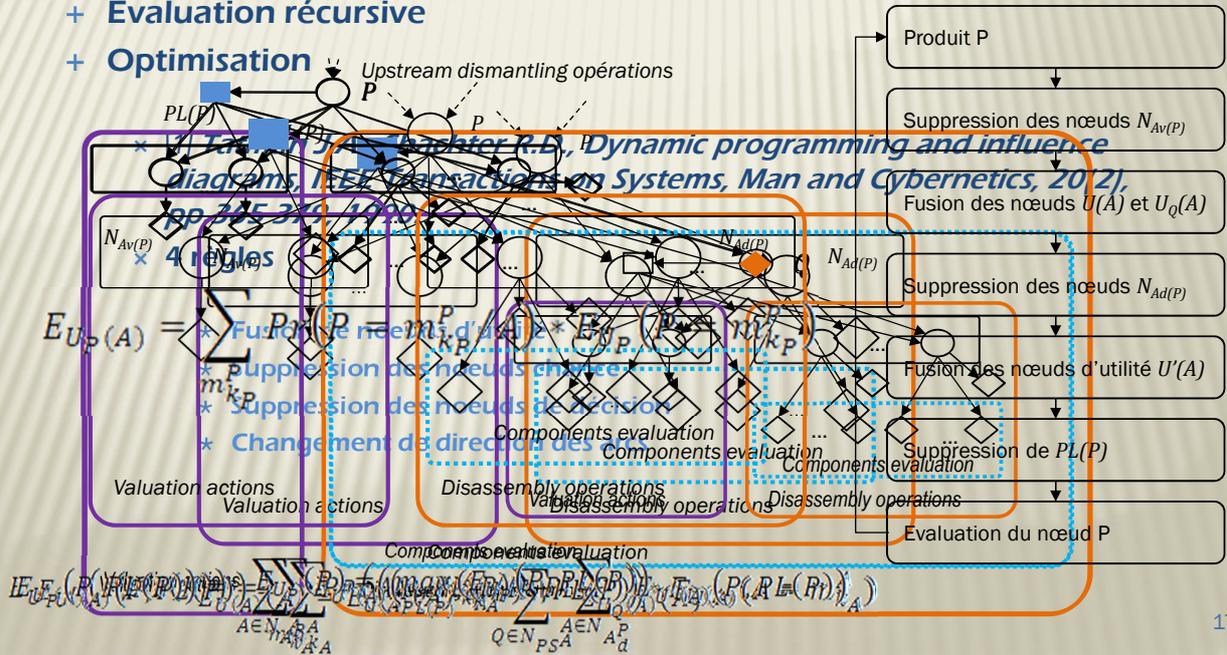
Operation				
	na	t1	t2	ar
utility	0	c1	c2	c3

Expected utility of operation:
 $EU(\text{Operation}) = Pr(t1)*c1 + Pr(t2)*c2 + Pr(ar)*c3$

16

EXTENSION

- o Détermination du processus de déconstruction
 - + Modèle générique
 - + Evaluation récursive
 - + Optimisation



Modélisation du démantèlement des systèmes complexes.

Projet DIAGNOSTAT

Journées de l'Automatique
Grenoble 5 octobre 2016

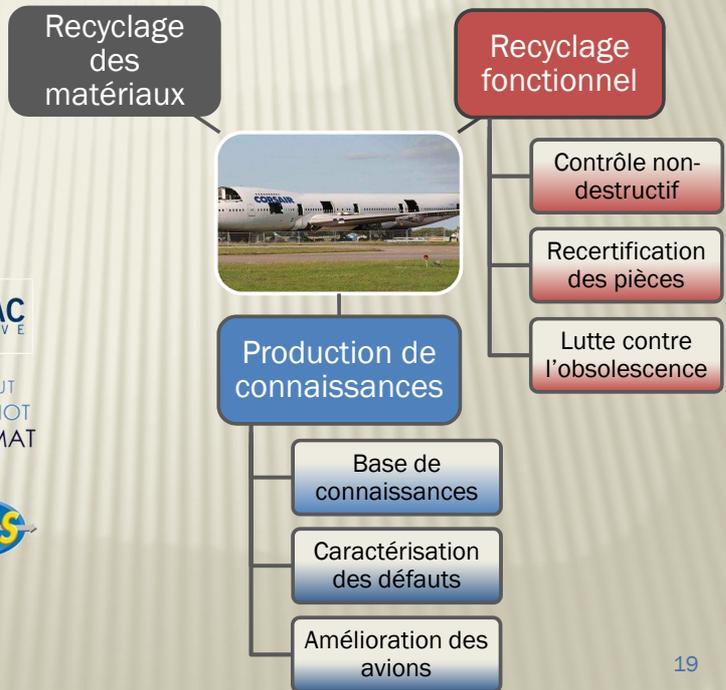


PROJET DIAGNOSTAT

- Projet labellisé Aerospace Valley avec un partenariat fort entre industriels et laboratoires



Objectifs



PRODUCTION DE CONNAISSANCE

PROBLÈME ET PISTES DE SOLUTION



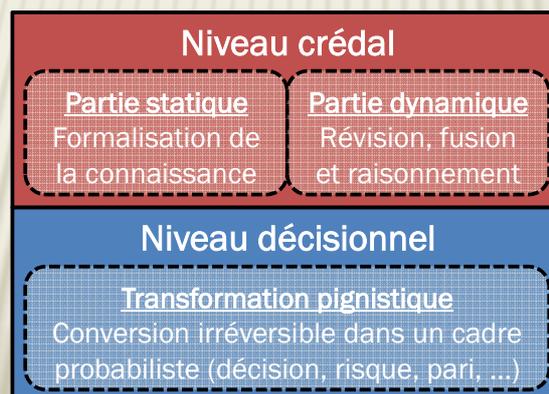
REPRÉSENTATION DE LA CONNAISSANCE

- ⇒ Fusion de connaissances issues de multiples sources hétérogènes
 - + Experts
 - + Bases de données
- ⇒ Modéliser l'incertitude épistémique (incomplétude et imprécision)
 - + Probabilité et incertitude épistémique ⇒ Principe d'indifférence
 - × Confusion entre aléatoire et épistémique
 - × Ambiguïté de la représentation
 - + Modélisation de la prise de décision humaine
- ⇒ Formalisme choisi: Théorie des fonctions de croyance

21

FONCTIONS DE CROYANCE

- ⇒ Théorie des fonctions de croyance
 - + Cadre général de représentation des incertitudes
 - + Évolution proposée par Smets^(a) ⇒ Modèle des Croyances Transférables
 - × Interprétation non-probabiliste des fonctions de croyance



^(a)Smets, P. et Kennes, R. (1994). *The transferable belief model*. Artificial Intelligence, volume 38, pages 133-147.

22

FONCTIONS DE CROYANCE

Formalisation

+ Cadre de discernement $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$

+ « Power set » $2^\Omega = \{\emptyset, \{\omega_1\}, \{\omega_2\}, \{\omega_1, \omega_2\}, \{\omega_3\}, \{\omega_1, \omega_3\}, \dots, \Omega\}$

+ Fonction de croyance

$$m^\Omega: 2^\Omega \rightarrow [0,1] \quad \sum_{A \subseteq \Omega} m^\Omega(A) = 1$$

$$A \mapsto m^\Omega(A)$$

Exemple de distribution de masses de croyance

	\emptyset	$\{\omega_1\}$	$\{\omega_2\}$	$\{\omega_1, \omega_2\}$	$\{\omega_3\}$	$\{\omega_1, \omega_3\}$	$\{\omega_2, \omega_3\}$	Ω
m^Ω	0	0,1	0,3	0	0,1	0,2	0	0,3

Connaissance certaine sur une partie et l'incertitude totale

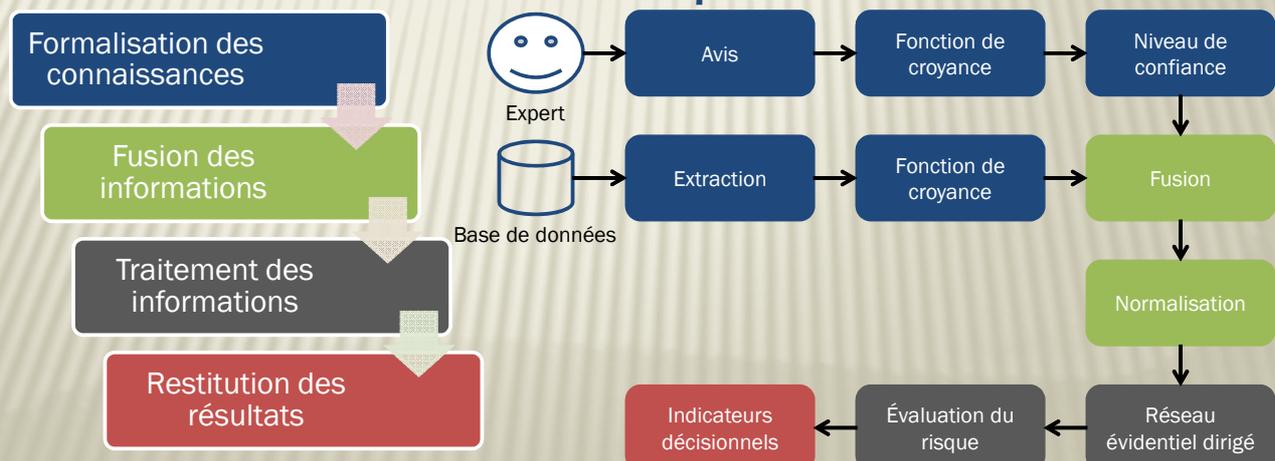
PROCESSUS D'ÉVALUATION DES RISQUES

Hypothèses de départ

+ Structure du réseau définie au préalable par un expert

+ Variables discrètes

Démarche d'évaluation des risques



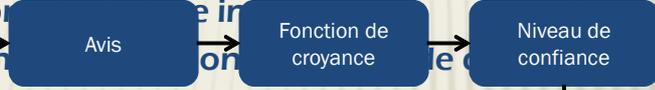
FORMALISATION DE LA CONNAISSANCE

Expertise

+ Probabilités subjectives

+ Transformation

+ Affaiblissement



Base de données

+ Extraction

+ Fonctions de croyance

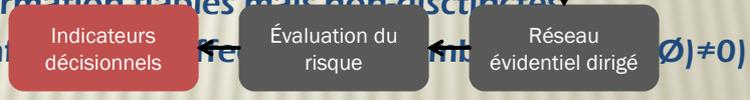


FUSION

Règle de combinaison conjonctive prudente

+ Sources d'information fiables mais non distinctes

+ Notion de conflit



Normalisation

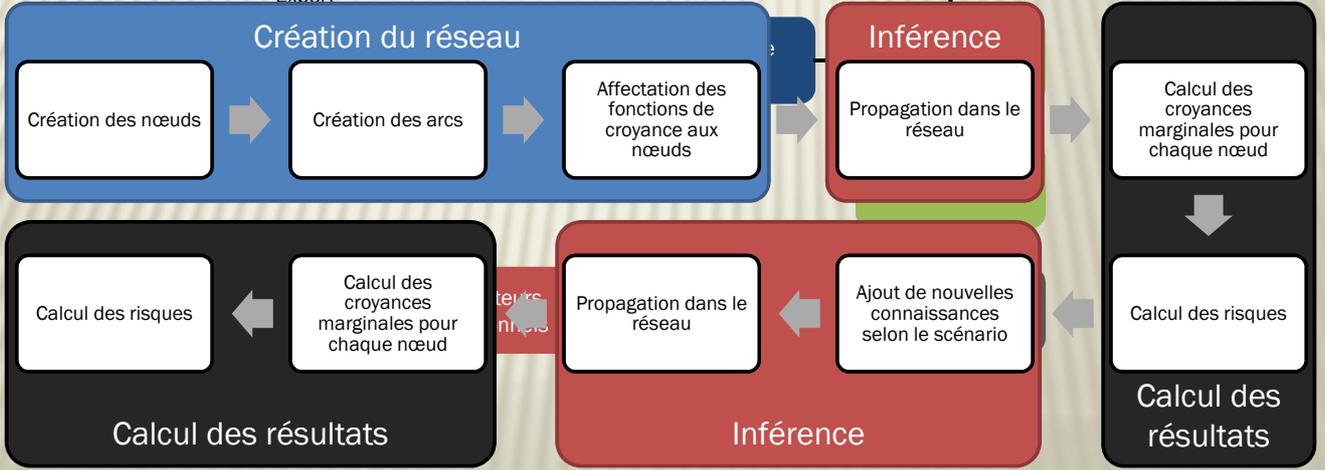
+ Répartition de la masse affectée à l'ensemble vide entre les autres éléments focaux

+ Eviter que le conflit ne devienne l'information prédominante

PROCESSUS D'ÉVALUATION DES RISQUES

Réseau évidentiel dirigé

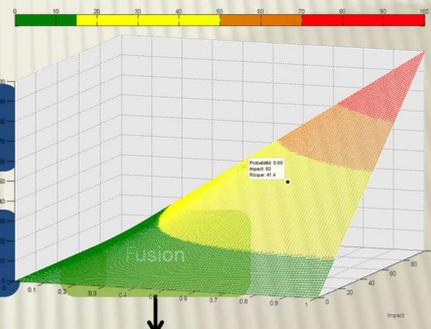
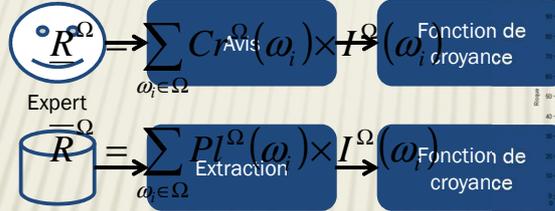
+ Inférence réalisée au moyen du Théorème de Bayes Généralisé et des règles de combinaison conjonctive



PROCESSUS D'ÉVALUATION DES RISQUES

Indicateurs

+ Risque

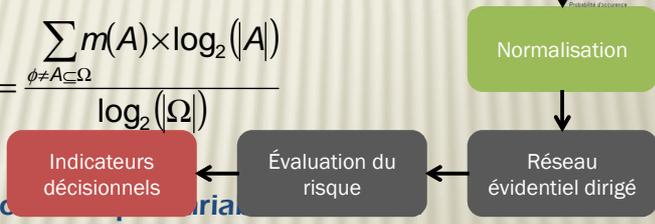


+ Incertitude

$$N_{\%}(m) = \frac{\sum_{\phi \neq A \subseteq \Omega} m(A) \times \log_2(|A|)}{\log_2(|\Omega|)}$$

+ Conflit

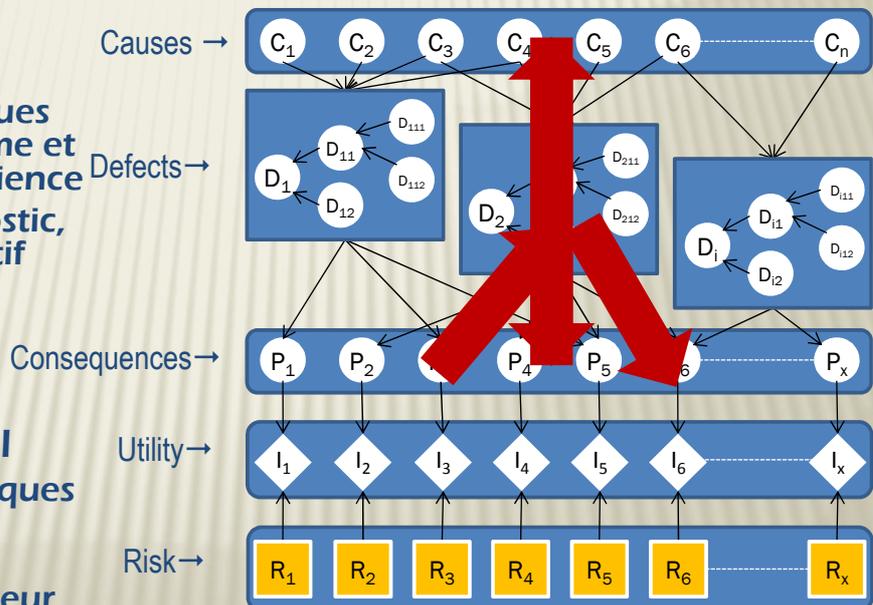
- × Indicateur pour les variables
- × Défini avant la normalisation



NETWORK STRUCTURE

Niveau évidentiel

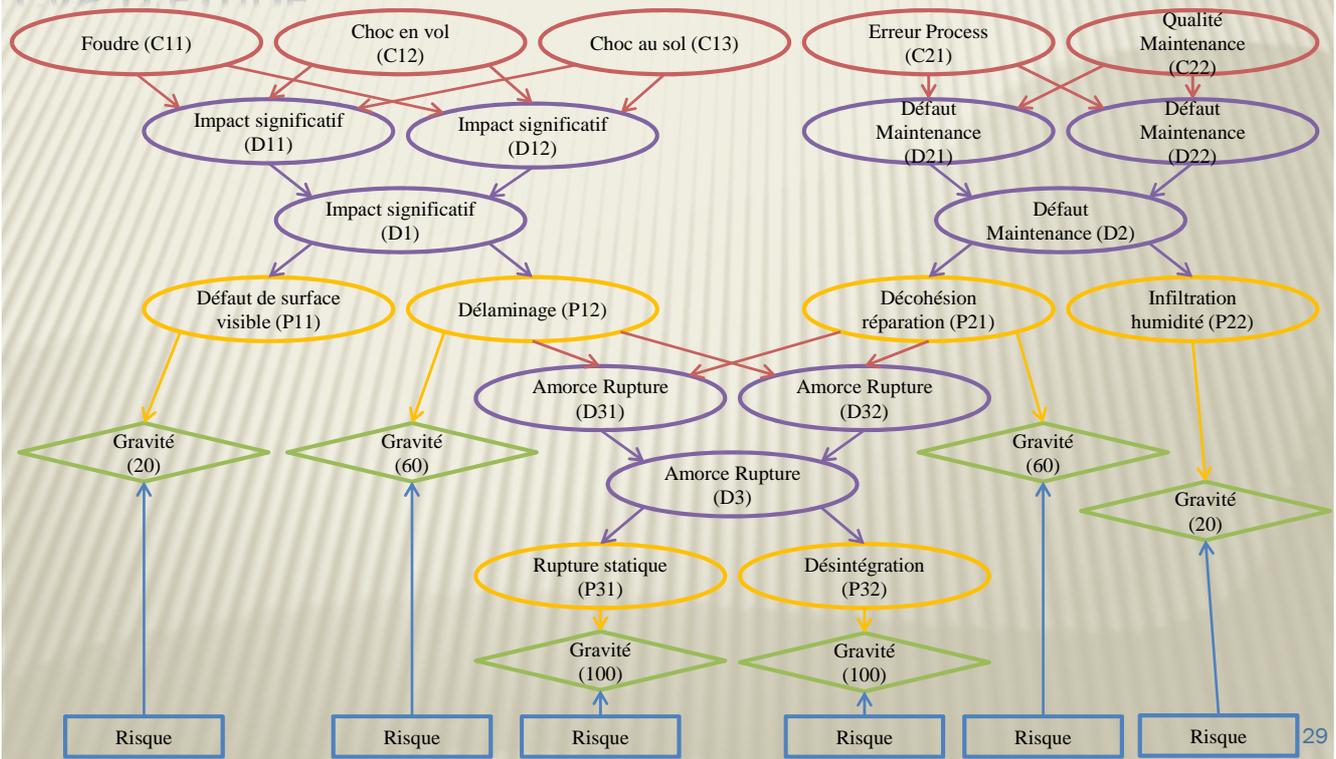
- + Ajout de connaissances issues de l'état du système et du retour d'expérience
- + Diagnostic, pronostic, diagnostic prédictif



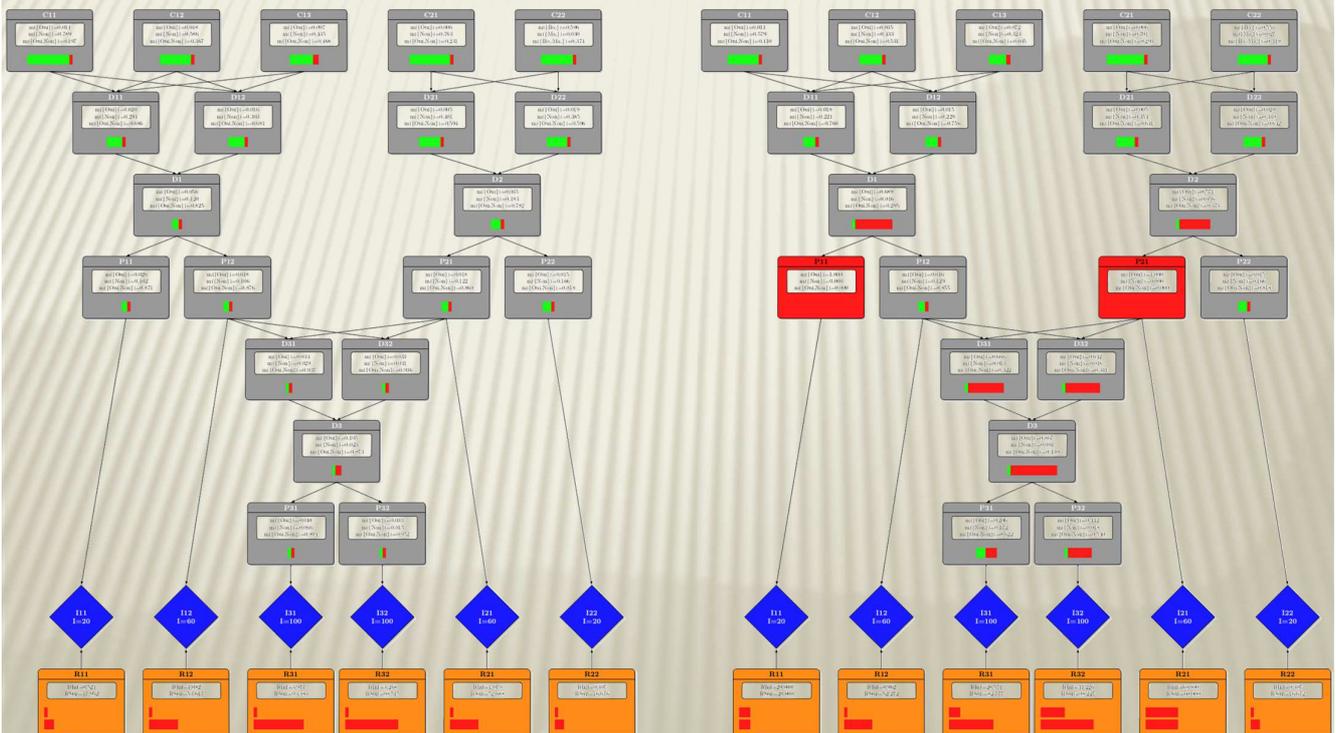
Niveau décisionnel

- + Evaluation des risques pour chaque conséquence
- + Création d'indicateur pour aider à la décision

CAS D'ÉTUDE



IMPLÉMENTATION



CONCLUSION

- ⇒ Proposition d'une approche complète d'évaluation des risques basées sur les fonctions de croyance et les Réseaux Evidentiels Dirigés (RED)
- ⇒ Développement d'un outil de simulation basé sur les RED
- ⇒ Approche testée grâce à des scénarios réalistes dans le domaine du démantèlement aéronautique

31

CONCLUSION

- ⇒ Le démantèlement demeure une filière à industrialiser aux potentialités économiques et environnementales fortes
- ⇒ D'autres filières (ferroviaires et surtout navales) sont également en train de se structurer : des rapprochements sont envisageables.



Merci pour votre attention

32