

Édouard THOMAS

Contribution à la prise de décision dynamique en maintenance prévisionnelle par formalisation d'un principe d'opportunité

15 juillet 2009

Directeur : **Benoît IUNG**

Codirecteur : **Éric LEVRAT**

Centre de recherche en automatique de Nancy

Unité mixte de recherche CNRS - Nancy-Université

Faculté des Sciences et Techniques BP 239

Vandœuvre-lès-Nancy F-54506 France



UMR 7039

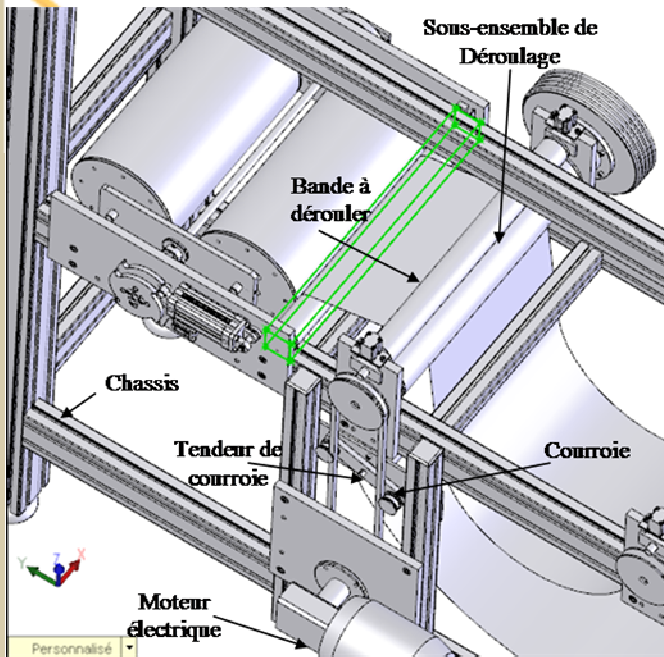


Nancy-Université

Systemes industriels : dégradation

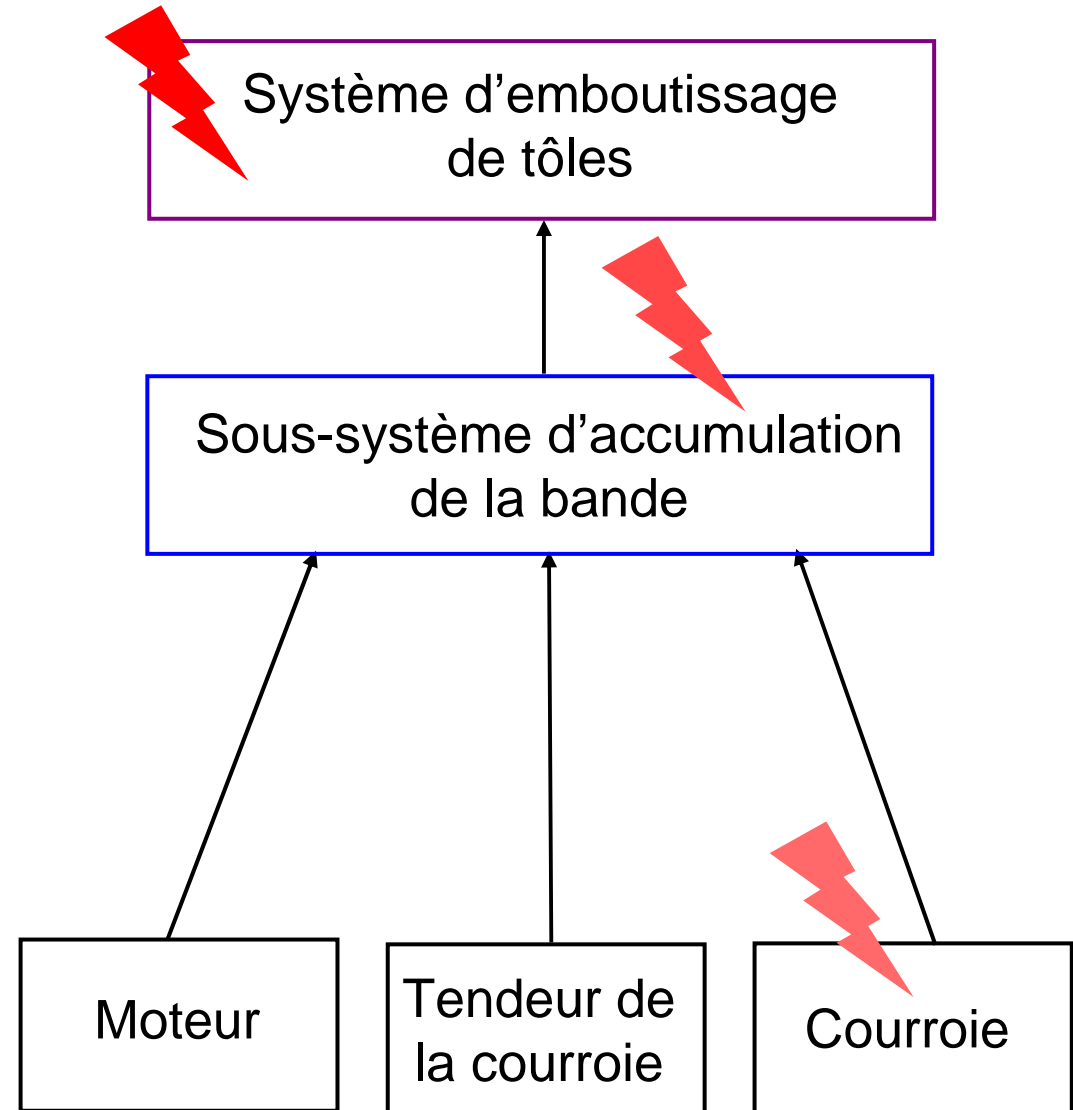
Systemes industriels :

- Composants en phase de **dégradation**



Plateforme TELMA

- Rétablir et maintenir les **performances**

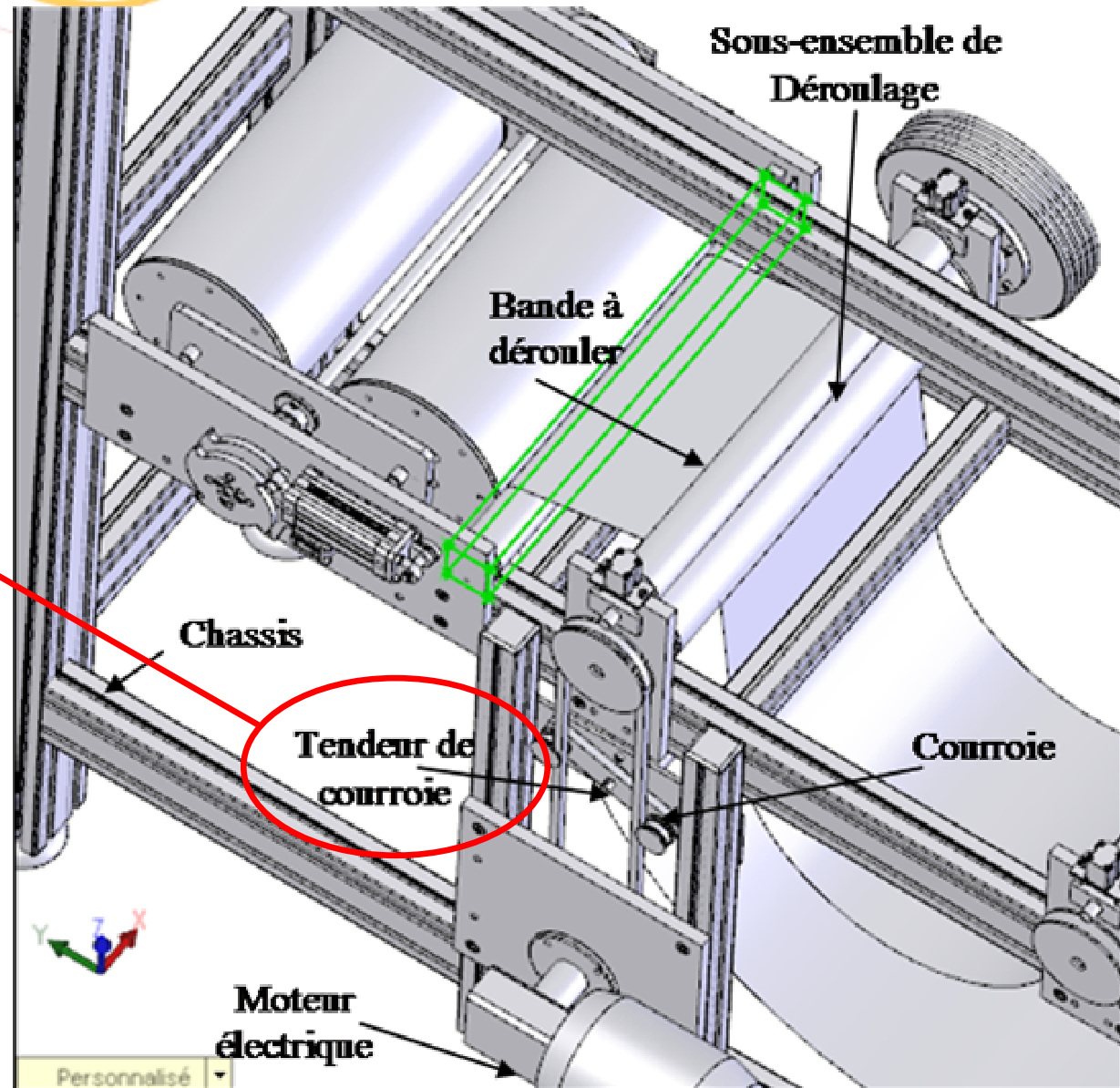


Différentes stratégies de maintenance

Développement
de stratégies
de maintenance :

- Préventive
systématique

Plateforme TELMA

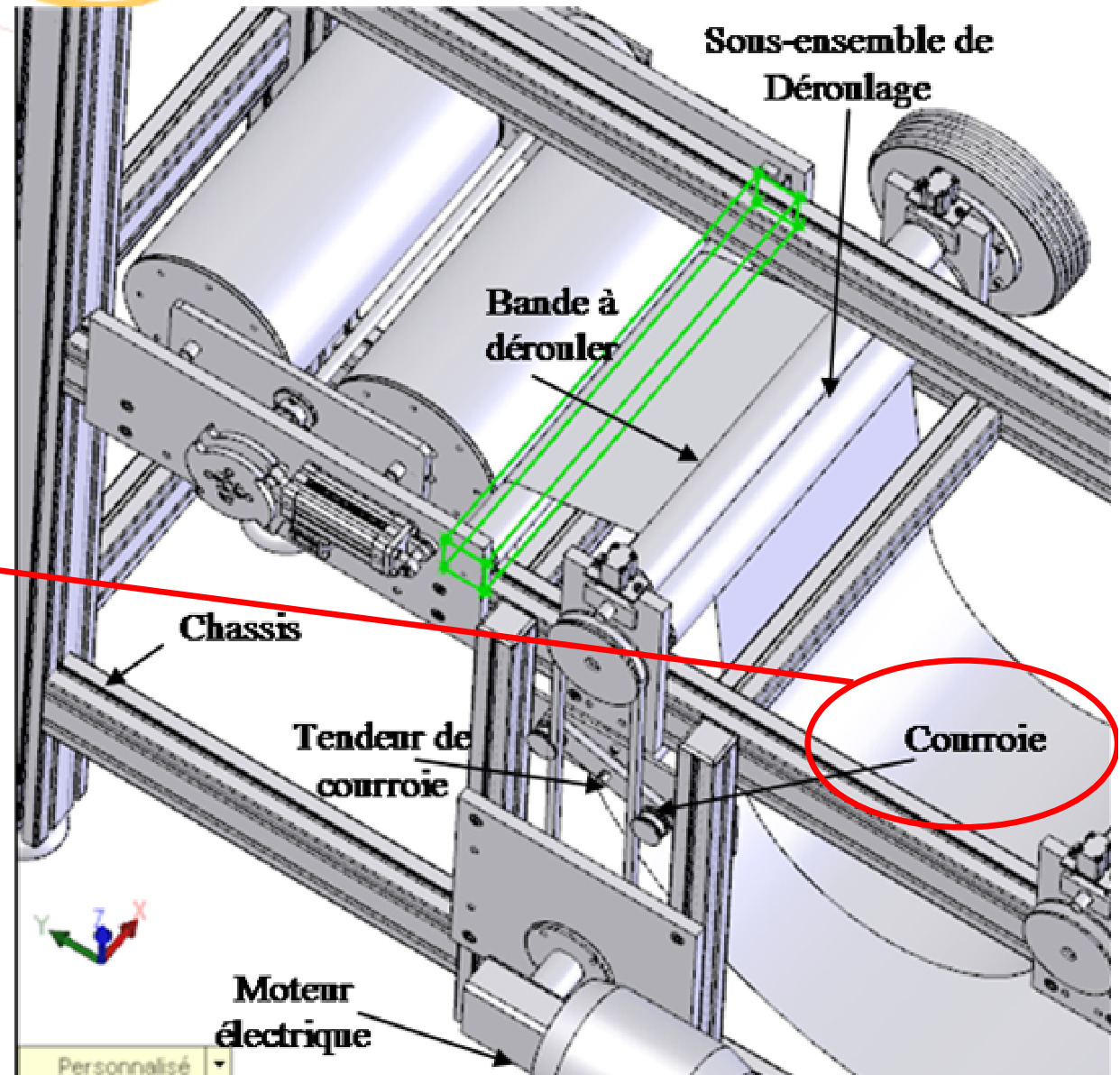


Différentes stratégies de maintenance

Développement
de stratégies
de maintenance :

- Préventive
systématique
- **Conditionnelle**

Plateforme TELMA

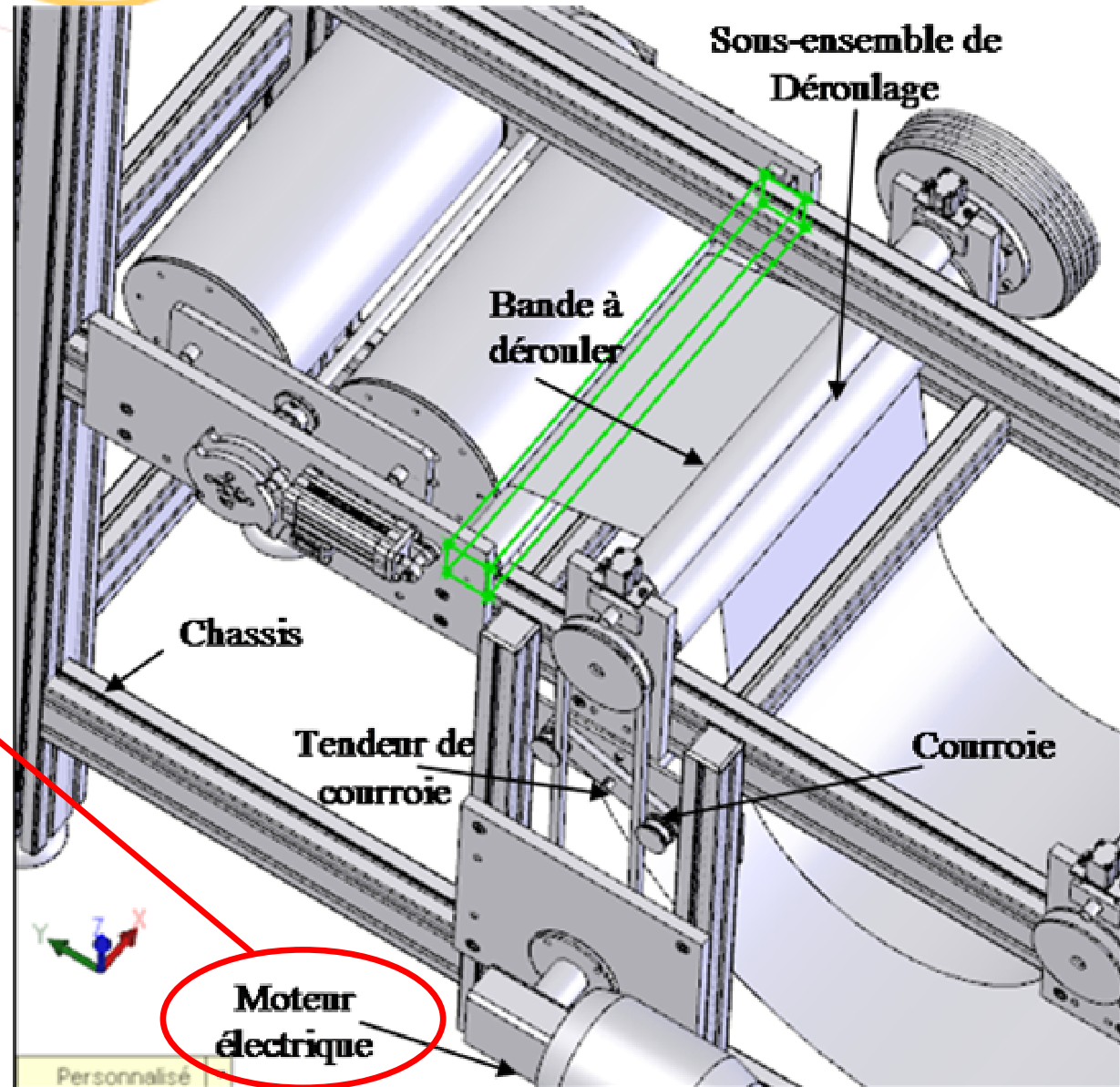


Différentes stratégies de maintenance

Développement
de stratégies
de maintenance :

- Préventive
systématique
- Conditionnelle
- **Prévisionnelle**

Plateforme TELMA

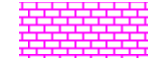


La maintenance prévisionnelle

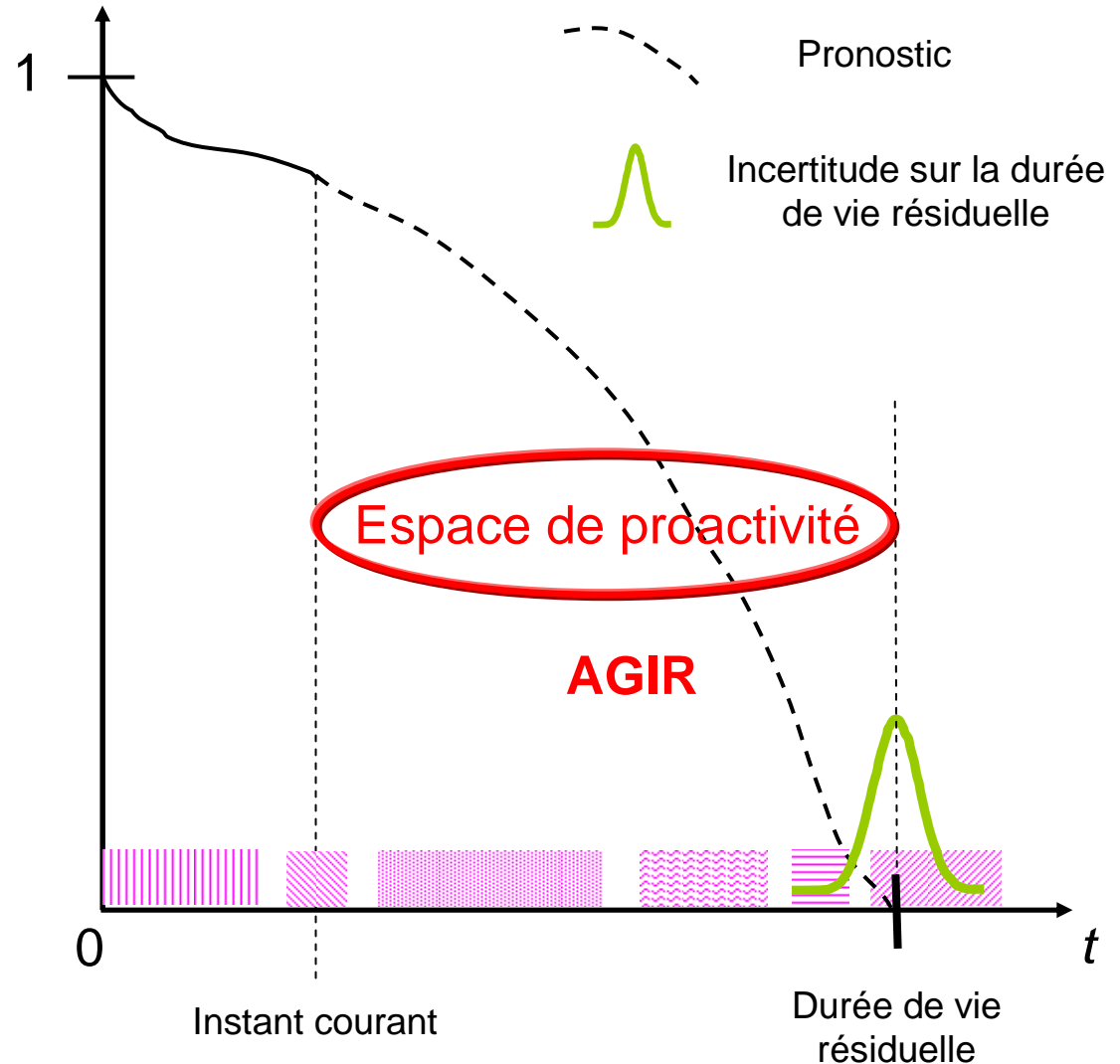
Maintenance prévisionnelle
Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien

[Norme NF EN 13306:2001]

Probabilité (la performance est satisfaisante avant t)

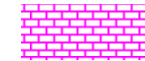


Conditions de production

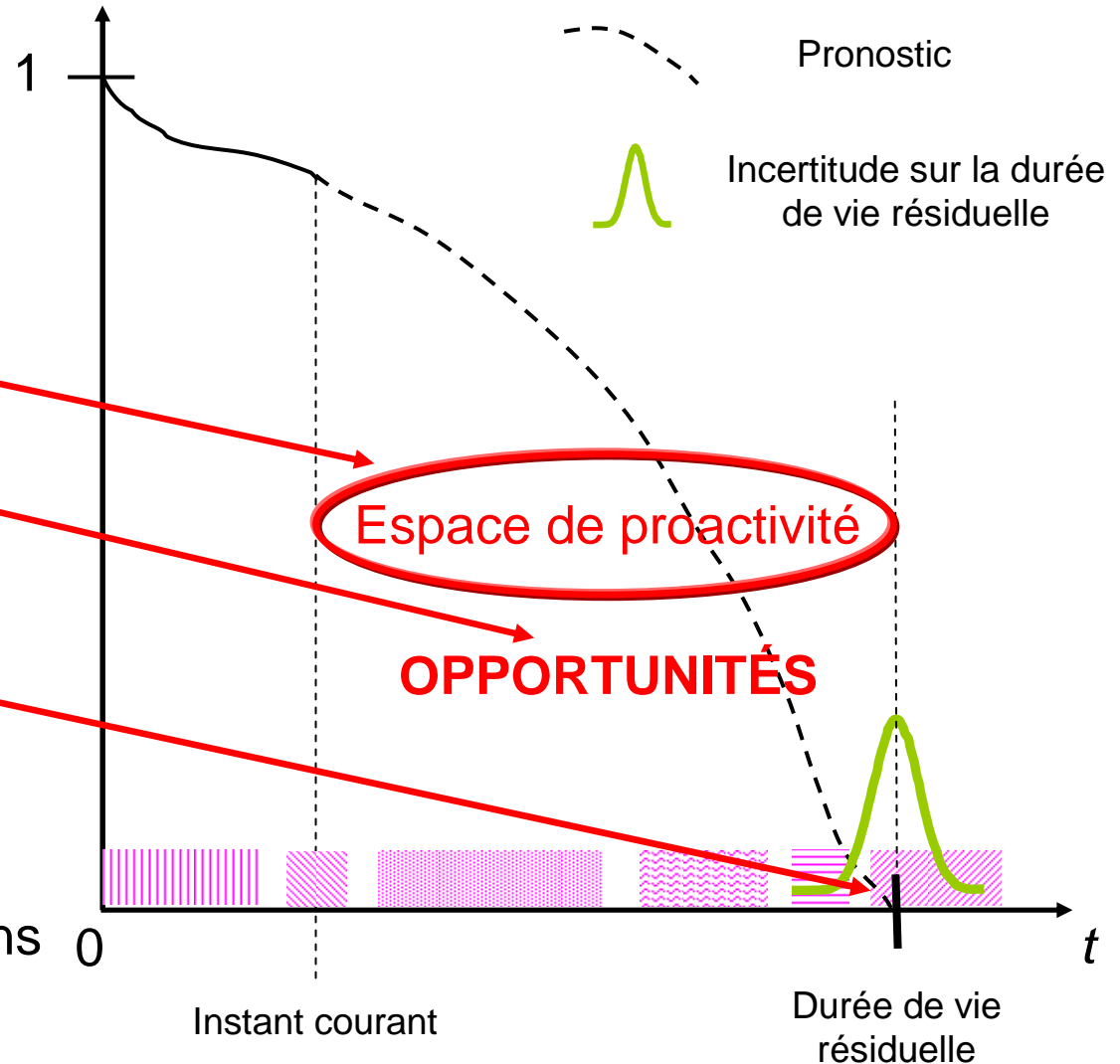


La maintenance prévisionnelle

Probabilité (la performance est satisfaisante avant t)



Conditions de production



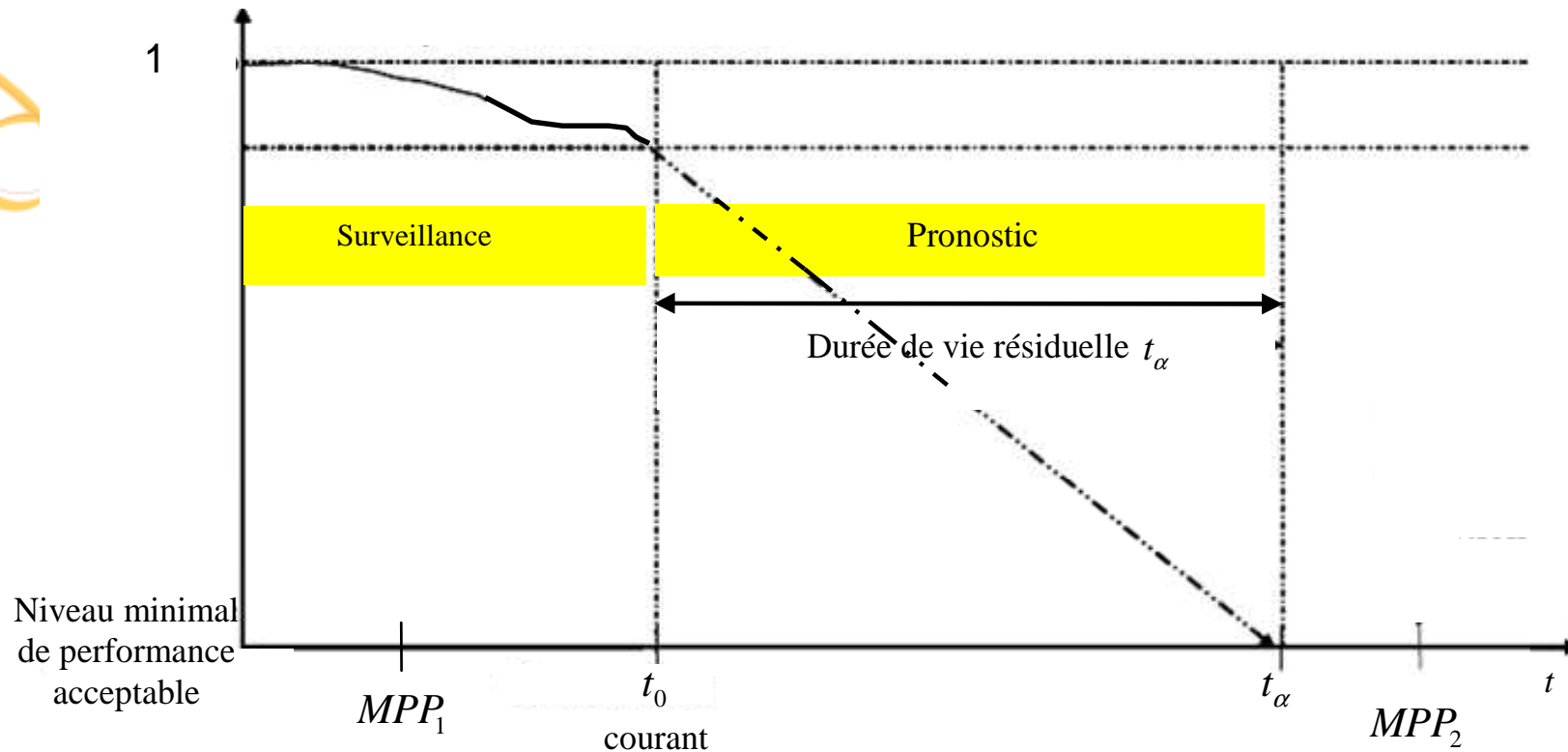
Maintenance prévisionnelle

- Aspect **anticipatif** (horizon temporel)
- Aspect **proactif** (investigation d'actions) [Budai, *et al.*, 2006]
- Aspect **dynamique** (évolution de la durée de vie résiduelle et de l'horizon temporel en fonction des conditions d'utilisation)

La surveillance pour la maintenance prévisionnelle

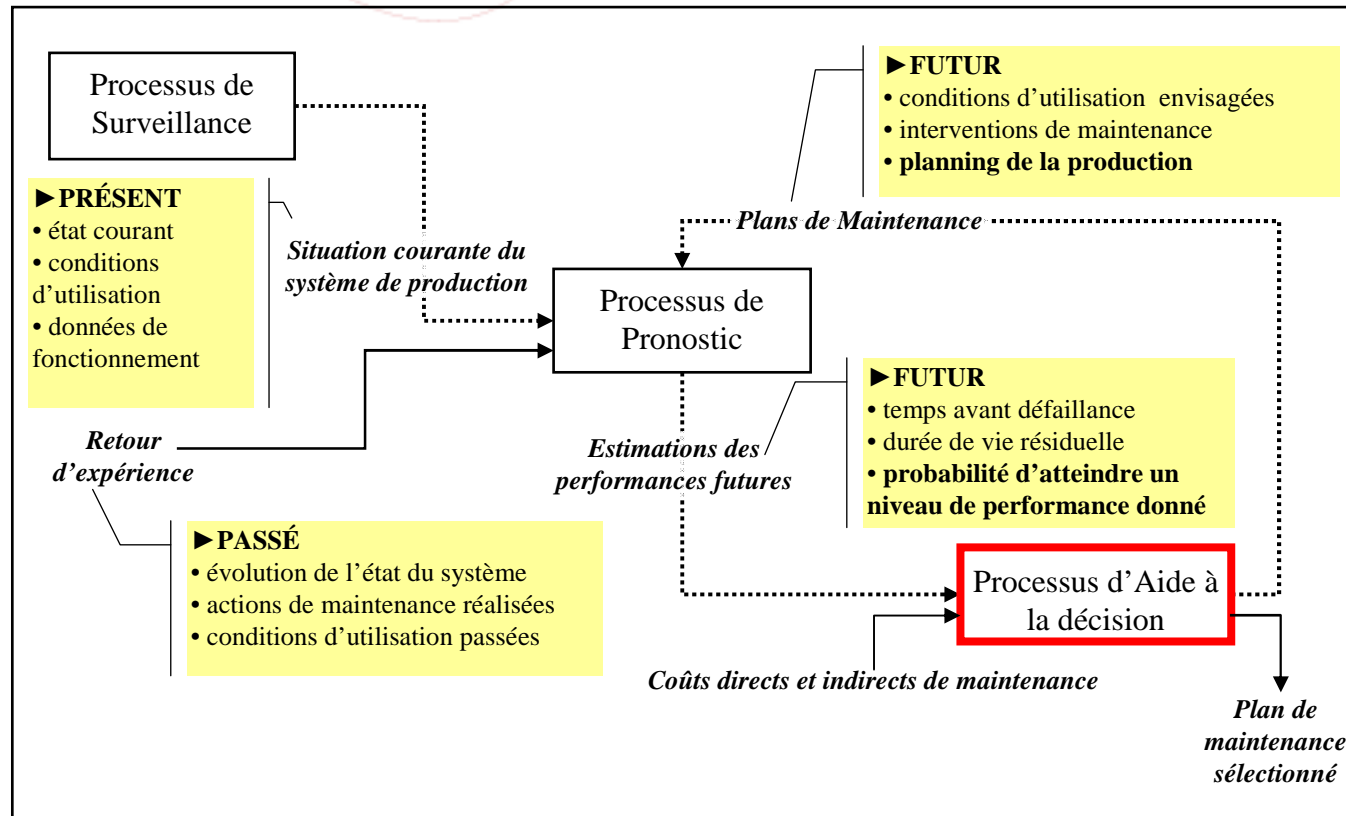
Surveiller les composants critiques

Probabilité (la performance est satisfaisante avant t)



Calcul d'une durée de vie résiduelle ou de la probabilité d'atteindre une performance (**pronostic**)

Les processus de pronostic et d'aide à la décision



Bouclage pronostic–aide à la décision

[Léger, 1999]
[Muller, 2005]

- Dégradation des composants d'un système industriel
- Stratégies de maintenance prévisionnelle
- Aspects anticipatif, proactif, dynamique
- Ouvre des « opportunités » pour la décision de maintenance
- Développer des outils pour l'aide à la décision de maintenance

Problématiques de l'aide à la décision de maintenance prévisionnelle

(Q1) La maintenance prévisionnelle exploite-t-elle, par ses aspects anticipatif et proactif, des opportunités ? Lesquelles ?

(Q2) Sur l'espace de proactivité, quels instants privilégier pour la maintenance de sorte à exploiter au maximum le composant et à minimiser l'impact sur la production ?

(Q3) Comment investiguer de nouvelles actions de maintenance préventive sur l'espace de proactivité à partir d'une intervention sur le composant dégradé C ? Sur la base de quels critères ?

- I. Vers une décision de maintenance opportune de première et seconde espèce
- II. Synchronisation maintenance–production (algorithme de Bruss) pour les actions de première espèce
- III. Regroupement des composants (relations d'équivalence) pour les actions de seconde espèce
- IV. Application à la plateforme TELMA
- V. Conclusions et perspectives

I. Vers une décision de maintenance opportune de première et seconde espèce

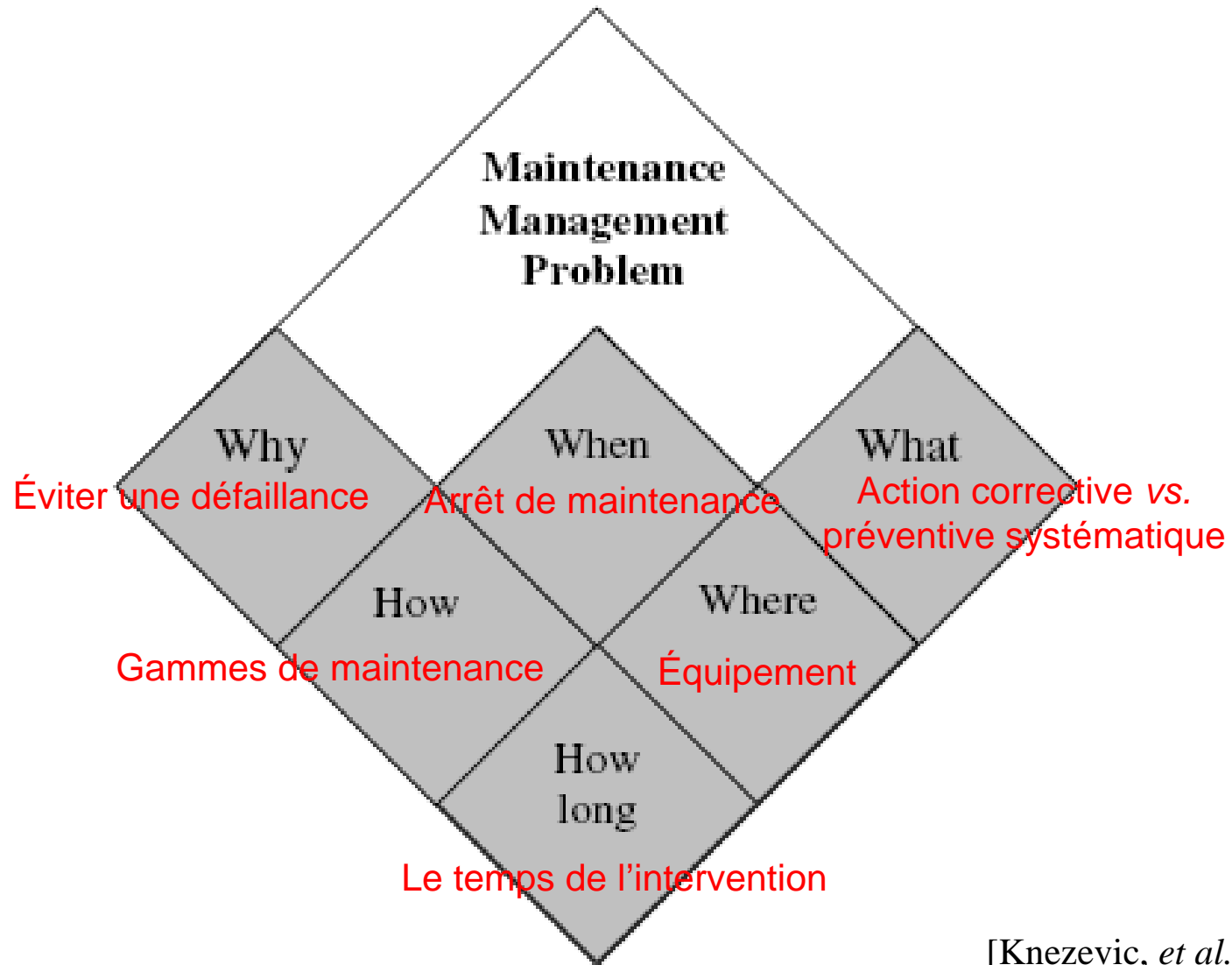
II. Synchronisation maintenance–production (algorithme de Bruss) pour les actions de première espèce

III. Regroupement des composants (relations d'équivalence) pour les actions de seconde espèce

IV. Application à la plateforme TELMA

V. Conclusions et perspectives

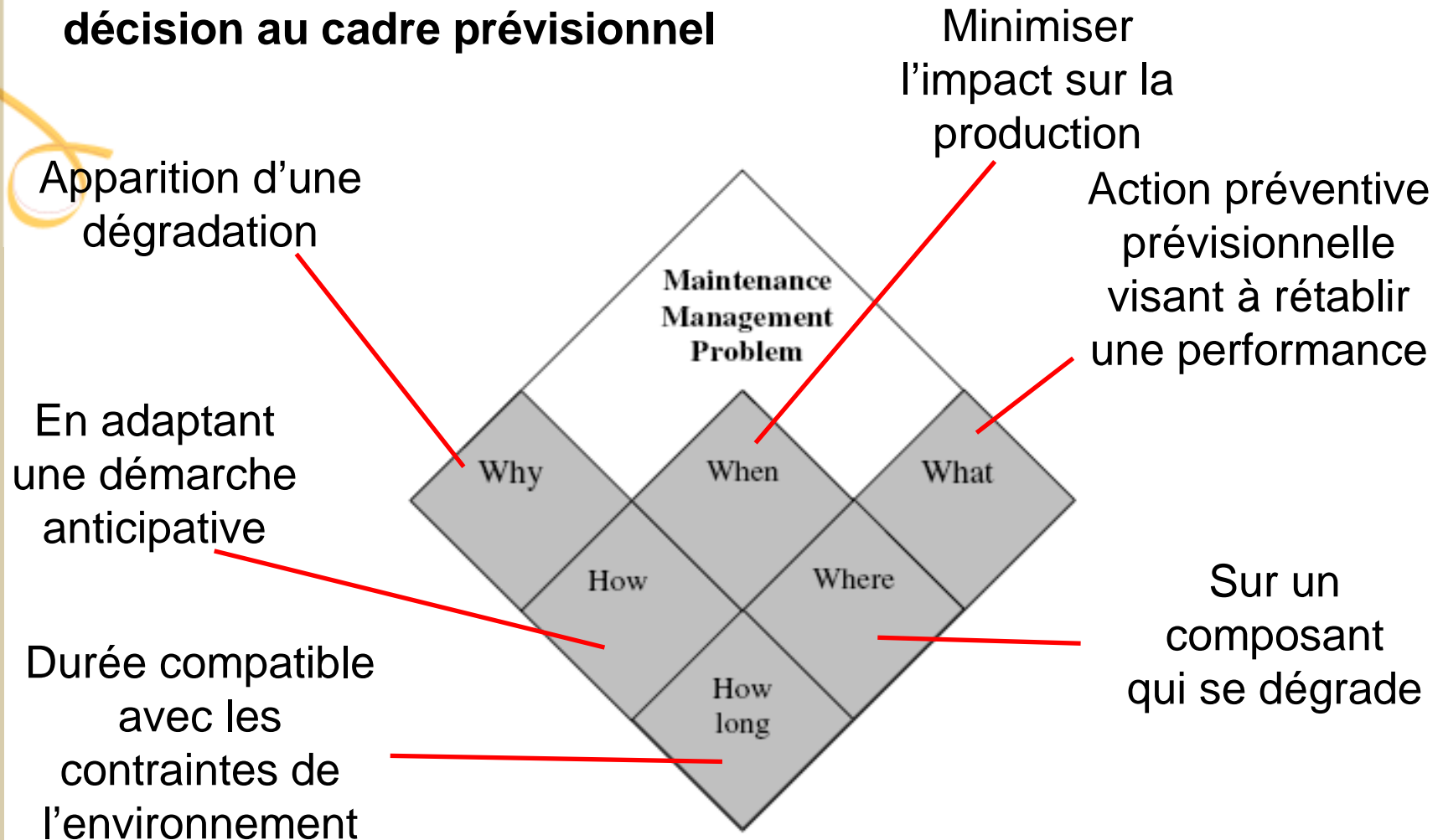
La décision de maintenance : cadre classique



[Knezevic, *et al.*, 1997]

La décision de maintenance : cadre prévisionnel

Adapter le processus d'aide à la décision au cadre prévisionnel



Le processus d'aide à la décision de maintenance prévisionnelle

Proposition :

- Exploitation potentielle de toute « opportunité » pour la maintenance
- Élimination des alternatives uniquement pour des raisons objectives liées aux critères ou à la performance globale [Emblemsvåg and Tønning, 2003]
- Classement des alternatives selon des critères représentatifs des performances

Contexte :

Ensemble des possibles plus vaste !

Qu'est-ce qu'une opportunité pour la maintenance ?

(Q1) La maintenance prévisionnelle exploite-t-elle, par ses aspects anticipatif et proactif, des opportunités ? Lesquelles ?

(Q2) Sur l'espace de proactivité, quels instants privilégier pour la maintenance de sorte à exploiter au maximum le composant et à minimiser l'impact sur la production ?

Contrainte : minimiser l'impact de l'intervention sur la production

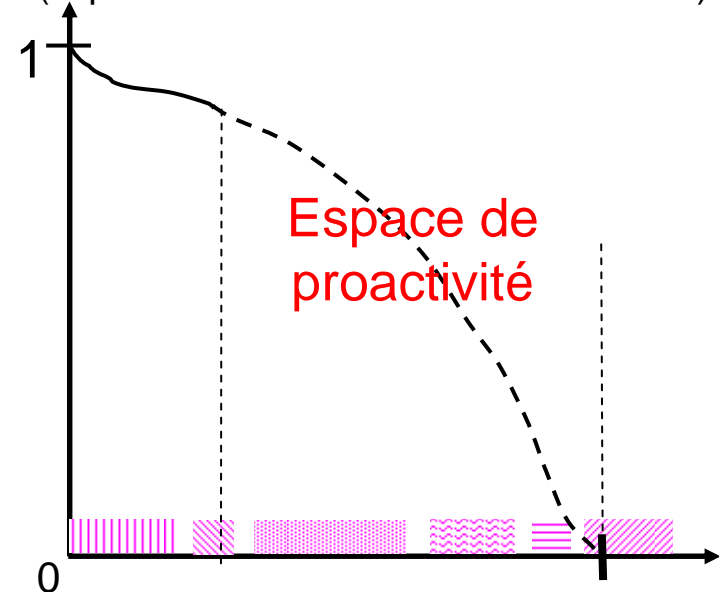
Qu'est-ce qu'une opportunité pour la maintenance ?

(Q1) La maintenance prévisionnelle exploite-t-elle, par ses aspects anticipatif et proactif, des opportunités ? Lesquelles ?

(Q2) Sur l'espace de proactivité, quels instants privilégier pour la maintenance de sorte à exploiter au maximum le composant et à minimiser l'impact sur la production ?

Contrainte : minimiser l'impact de l'intervention sur la production

Probabilité (la performance est satisfaisante avant t)



Qu'est-ce qu'une opportunité pour la maintenance ?

(Q1) La maintenance prévisionnelle exploite-t-elle, par ses aspects anticipatif et proactif, des opportunités ? Lesquelles ?

(Q2) Sur l'espace de proactivité, quels instants privilégier pour la maintenance de sorte à exploiter au maximum le composant et à minimiser l'impact sur la production ?

Contrainte : minimiser l'impact de l'intervention sur la production

Exploiter les arrêts de production !

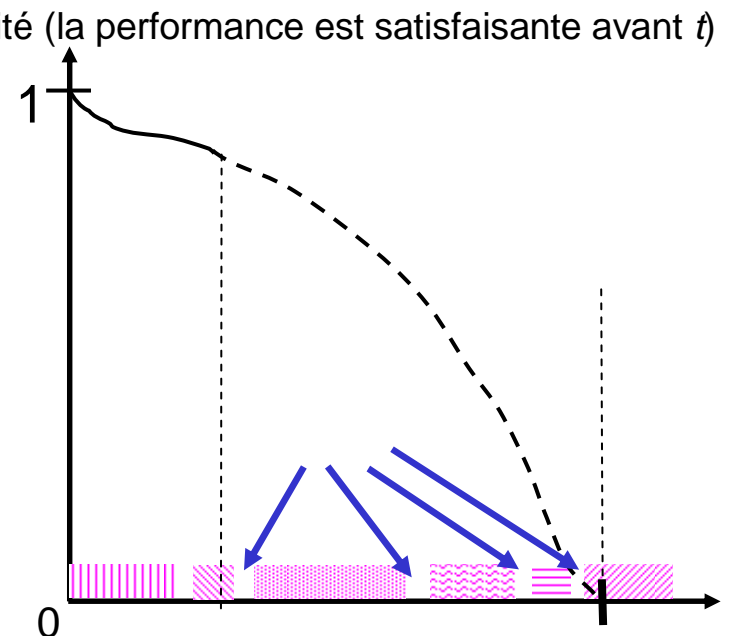
[Budai, et al., 2006]

Terminologie :

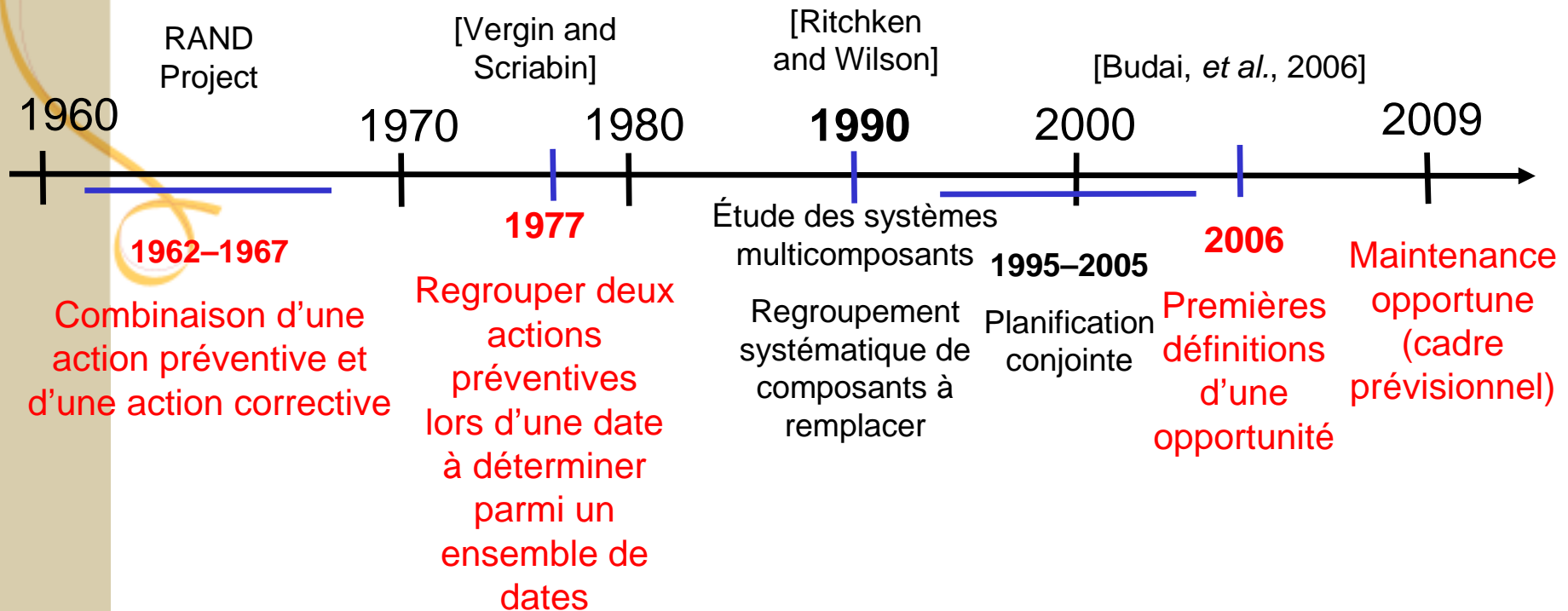
Opportunité

Opportunité pour la maintenance

Maintenance opportuniste



La « maintenance opportuniste » : dates clés



[Budai, et al., 2006] :

Une **opportunité** est toute interruption du processus de production.

Une **opportunité pour la maintenance** est un instant au cours duquel

(i) les composants à maintenir sont moins sollicités qu'à l'usuel,

(ii) qui n'apparaît qu'occasionnellement, (iii) qu'il est difficile de prévoir par avance.

La maintenance opportuniste : discussion

Une **opportunité pour la maintenance** est un instant au cours duquel
(i) les composants à maintenir sont moins sollicités qu'à l'usuel,
(ii) qui n'apparaît qu'occasionnellement,
(iii) qu'il est difficile de prévoir par avance.

Formalisation ?

Adapté au cadre prévisionnel ?

Sécurité ?

Synthèse :

Des réalités et des contextes variés

Pas d'acceptation consensuelle

Deux notions fortement représentées (action préventive associée à une action corrective & regroupement d'actions préventives, pour optimiser des ressources).

Non planifiable

La défaillance comme élément déclencheur

Une tentative non satisfaisante de définition

Vers une maintenance « opportune »

La notion de maintenance opportune

Action de maintenance opportune de première espèce :

action de maintenance effectuée durant un arrêt de production.

(*Opportunité* dans [Budai, *et al.*, 2006])

Action de maintenance C-opportune de seconde espèce :

action de maintenance préventive réalisée, en coïncidence avec une action sur le composant C , sur un composant dégradé D qui partage avec C l'une au moins des conditions :

- être proche,
- être lié par un flux de matière ou d'énergie,
- participer à une même fonction du système,
- posséder la même gamme de consignation–déconsignation pour une action préventive donnée,
- nécessiter les mêmes outils et compétences à l'accès.

Notre cadre pour la décision de maintenance

Événement déclencheur d'une intervention de maintenance opportune :

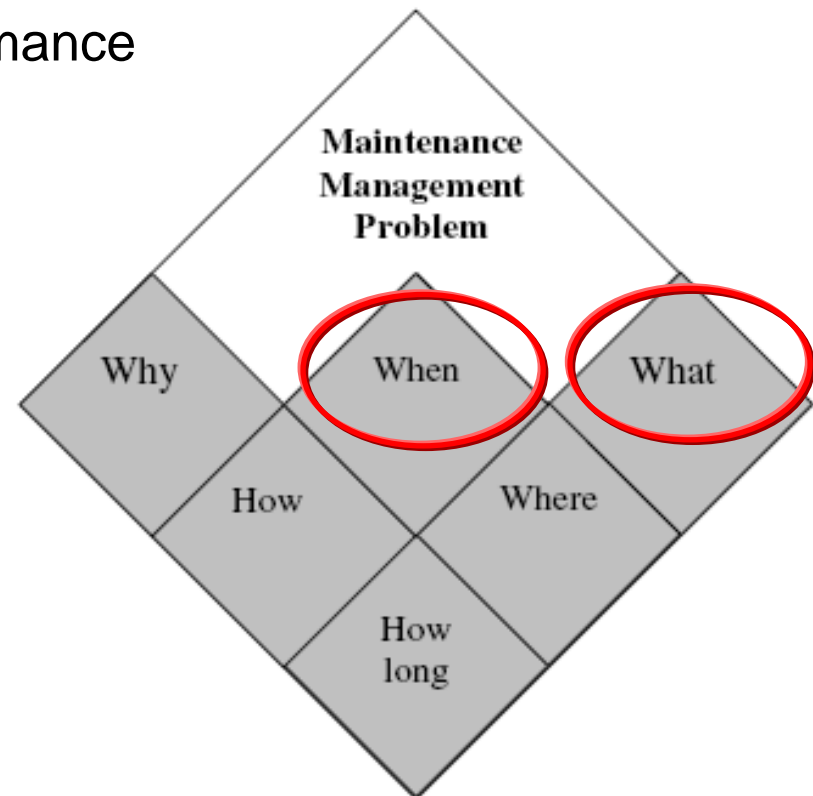
- la donnée d'une interruption future de la production,
- l'apparition d'une dégradation sur un composant surveillé du système,
- l'observation d'une perte de performance du système.

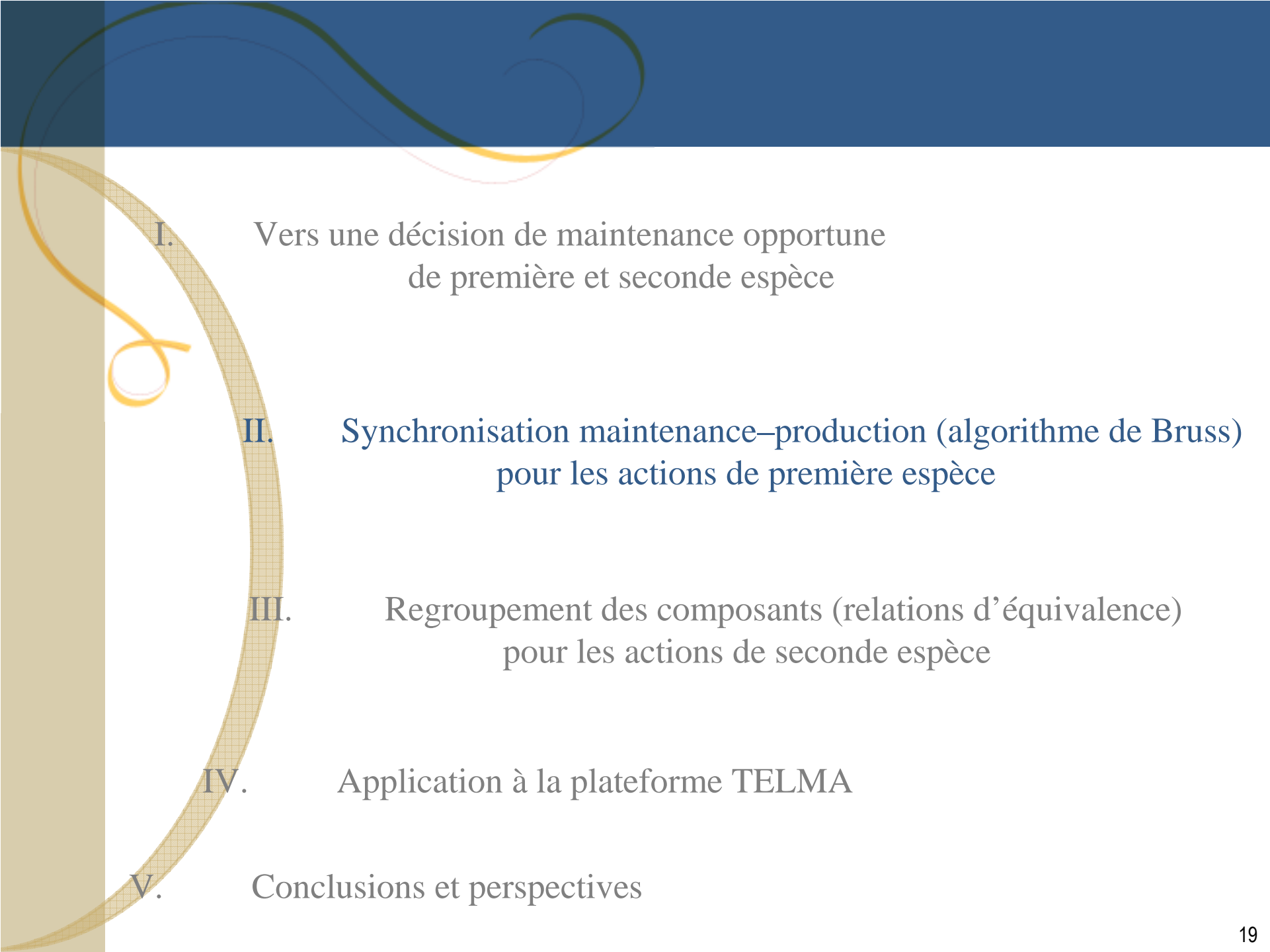
Maintenance opportune :

Formalisation de définitions adaptées à un cadre prévisionnel

Première espèce : synchronisation production–maintenance

Seconde espèce : regroupement de composants



- 
- I. Vers une décision de maintenance opportune de première et seconde espèce
 - II. Synchronisation maintenance–production (algorithme de Bruss) pour les actions de première espèce
 - III. Regroupement des composants (relations d'équivalence) pour les actions de seconde espèce
 - IV. Application à la plateforme TELMA
 - V. Conclusions et perspectives

Synchronisation production-maintenance

(Q2) Sur l'espace de proactivité, quels instants privilégier pour la maintenance de sorte à exploiter au maximum le composant ?

Synchronisation production-maintenance

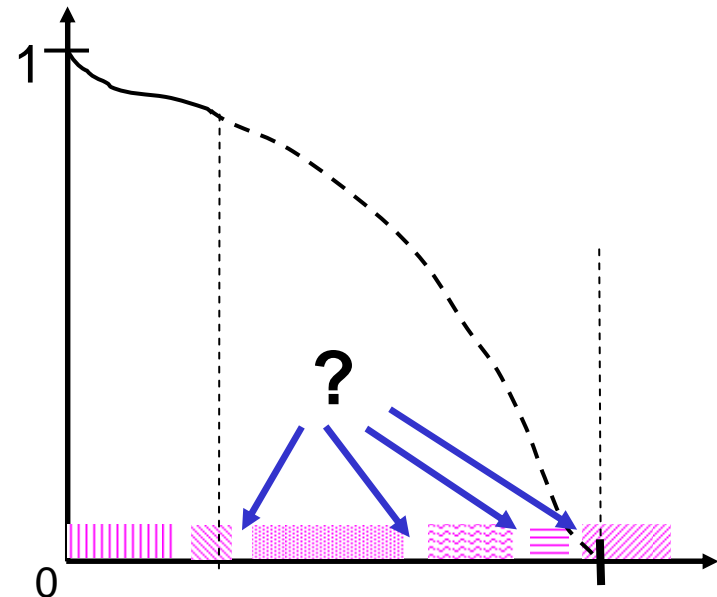
(Q2) Sur l'espace de proactivité, quels instants privilégier pour la maintenance de sorte à exploiter au maximum le composant ?



(Q2') Le décideur peut-il sélectionner un arrêt de production pour effectuer une intervention de maintenance prévisionnelle et minimiser l'impact sur la production ?

- Sélectionner le **dernier** arrêt propice
- Problématique de type arrêt optimal
- succès = arrêt de production propice au développement d'une intervention de maintenance prévisionnelle

Probabilité (la performance est satisfaisante avant t)



Succès :

- arrêt de production pour une action de maintenance opportune de première espèce (*i.e.* qui permettra *a priori* de développer une action de maintenance préventive prévisionnelle)
- Notion incertaine
- Recherche d'un compromis entre production et maintenance
- Recherche du *dernier* succès

Caractéristiques :

- le composant doit être opérationnel au début d'un succès,
- l'intervention doit pouvoir être réalisée durant le succès.

Problème d'arrêt optimal : définitions

Espace probabilisé $(\Omega; G; P)$, $(G_i)_{i \in I}$ **filtration** sur G .

- Ω ensemble (fini)
- G tribu
- P fonction $G \rightarrow [0 ; 1]$

suite croissante de sous-tribus de G
 I sous-ensemble (fini) de \mathbb{N}

Problème d'arrêt optimal : définitions

Espace probabilisé $(\Omega; G; P)$, $(G_i)_{i \in I}$ filtration sur G .

Règle d'arrêt τ

variable aléatoire définie sur Ω et à valeurs dans $\mathbb{N} \cup \{+\infty\}$
telle que $P(\tau < +\infty) = 1$ et $\{\tau = i\} \in G_i, \forall i \in I$.

Problème d'arrêt optimal : définitions

Espace probabilisé $(\Omega; G; P)$, $(G_i)_{i \in I}$ filtration sur G .

Règle d'arrêt τ

$(x_i; G_i)_{i \in I}$ **suite stochastique intégrable**

La variable x_i est G_i -mesurable,
son espérance existe et est finie

Le problème de l'arrêt optimal

Espace probabilisé $(\Omega; G; P)$, $(G_i)_{i \in I}$ filtration sur G .

Règle d'arrêt τ

$(x_i; G_i)_{i \in I}$ suite stochastique intégrable

Construction d'une nouvelle variable aléatoire $x_\tau := \begin{cases} x_i & \text{sur } \{\tau = i\}, \\ 0 & \text{sur } \{\tau = +\infty\}. \end{cases}$

Problème de l'arrêt optimal :

Trouver une règle d'arrêt τ^* telle que $E(x_{\tau^*}) = \sup_{\tau} (E(x_{\tau}))$.

Quelle est la **nature** de la règle d'arrêt optimale ?

Le problème de choix d'un arrêt vu comme un problème d'arrêt optimal

Formalisation :

Le problème (**Q2'**) peut se mettre mathématiquement sous la forme d'un problème d'arrêt optimal [Chow, *et al.*, 1991]

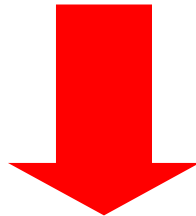
Outils de résolution :

Théorie des chaînes de Markov d'arrêt [Shiryayev, 1978 ; Billingsley, 2005]

Principe d'optimalité de Bellman [Bellman, 2003]

Hypothèse :

Indépendance des arrêts de production en pratique



Réponse complète et explicite grâce au ***théorème de Bruss***
[Bruss, 2000], [Bruss, 2002]

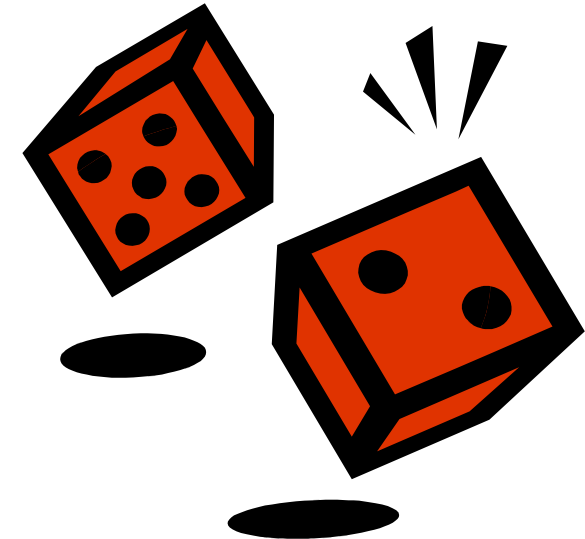
Problème d'arrêt pour le dé

Un dé juste à six faces

20 lancers **indépendants**

S'arrêter sur le **dernier** « 6 »

Trouver *a priori* une règle d'arrêt



Règle intuitive :

Un « 6 » en moyenne sur les six derniers lancers.

Laissez passer les 14 premiers jets, s'arrêter ensuite sur le premier « 6 », s'il en apparaît un !

Cette règle est optimale.

Être propice au développement d'une action de maintenance

- C : composant fixé du système de production
- Illustration sur un composant et un mode de dégradation
- Démarche valable pour tout équipement et tout mode de dégradation

Arrêt de production A : $(a(A) ; d(A))$

$a(A)$: début de A , $d(A)$: durée de A

Être survivant jusqu'à $a(A)$

$R(a(A))$

Avoir un niveau de performance
satisfaisant jusqu'à $a(A)$

$X(a(A)) = P(\text{la performance } X \text{ est satisfaisante avant } a(A))$

Être maintenable durant $d(A)$

$M(a(A))$

Cas d'un composant quelconque

Cas d'un composant surveillé

$P(A \text{ est un succès}) = R(a(A)).M(a(A))$ ou $X(a(A)).M(a(A))$
grâce à l'hypothèse d'indépendance

Théorème de Bruss appliqué à notre problème

La règle d'arrêt optimale consiste à s'arrêter au premier (s'il y en a un) indice k ($1 \leq k \leq n$) avec :

$$A_k \text{ un succès, et } k \geq s, \text{ où : } s = \sup \left(1; \sup \left(1 \leq k \leq n \mid \sum_{j=k}^n r_j \geq 1 \right) \right).$$

$$p_j = P(A_j \text{ est un succès}),$$

$$r_j : p_j / (1 - p_j) \quad (\text{odds})$$

Critère de performance du théorème :

$$V = V_s = \left(\prod_{j=s}^n (1 - p_j) \right) \cdot \sum_{j=s}^n r_j.$$

Supérieur à 36,78 % dès que la somme cumulée des *odds* atteint 1

Théorème **optimal** (au sens de la maximisation de la probabilité de sélectionner le dernier arrêt de production propice au développement d'une action opportune de première espèce)

Algorithme de Bruss

- Écrire dans cet ordre $p_n, p_{n-1}, p_{n-2} \dots p_1$
 $q_n, q_{n-1}, q_{n-2} \dots q_1$ où $q_j = 1 - p_j$
 $r_n, r_{n-1}, r_{n-2} \dots r_1$
- Calculer, pour s allant de n à 1 :
$$r_n + r_{n-1} + r_{n-2} + \dots + r_s =: R_s$$
- En déduire s
- Ignorer les $s - 1$ premiers arrêts de production
- Sélectionner le premier succès k après s
(p_k maximal parmi $p_s, p_{s+1} \dots p_n$)

Mise en œuvre sur un exemple académique

C_1 et C_2 deux composants, $RUL(C_1) = RUL(C_2) = 1\ 500$ h

18 arrêts programmés

| Numéro de l'arrêt de production | Début (h) | Durée (h) |
|---------------------------------|-----------|-----------|
| 1 | 80 | 3 |
| 2 | 140 | 2 |
| 3 | 200 | 4 |
| 4 | 310 | 2 |
| 5 | 400 | 1 |
| 6 | 560 | 4 |
| 7 | 620 | 4 |
| 8 | 690 | 2 |
| 9 | 730 | 1 |
| 10 | 800 | 7 |
| 11 | 910 | 3 |
| 12 | 980 | 14 |
| 13 | 1050 | 8 |
| 14 | 1100 | 4 |
| 15 | 1250 | 3 |
| 16 | 1360 | 4 |
| 17 | 1380 | 4 |
| 18 | 1400 | 5 |

Fiabilité :

Weibull(1,5 ; 500 ; 0)

Weibull (2 ; 400 ; 0)

Maintenabilité :

Exp(0,3)

Exp(0,8)

$P(A_{10} \text{ succès pour } C_1) =$

$$\exp\left(\left(-\frac{800-0}{500}\right)^{1,5}\right) \cdot (1 - \exp(-0,3 \times 7))$$

Classement de toutes les alternatives

| Choix | Numéro de l'arrêt | |
|----------|-------------------|----------|
| | C_1 | C_2 |
| 1 | 6 | 4 |
| 2 | 4 | 3 |
| 3 | 3 | 2 |
| 4 | 2 | 1 |
| 5 | 1 | 5 |
| 6 | 7 | 6 |
| 7 | 5 | 7 |
| 8 | 10 | 8 |
| 9 | 8 | 9 |
| 10 | 12 | 10 |
| 11 | 11 | 11 |
| 12 | 13 | 12 |
| 13 | 9 | 13 |
| 14 | 14 | 14 |
| 15 | 15 | 15 |
| 16 | 16 | 16 |
| 17 | 18 | 17 |
| 18 | 17 | 18 |

Obtention de l'arrêt optimal

Algorithme de Bruss [Thomas, *et al.*, 2006]

Classement de tous les arrêts par ordre décroissant

Utilisation récursive de l'algorithme [Levrat, *et al.*, 2008]

D'autres développements
sont possibles !

| Choix | Numéro de l'arrêt | |
|-------|-------------------|-------|
| | C_1 | C_2 |
| 1 | 6 | 4 |
| 2 | 4 | 3 |
| 3 | 3 | 2 |
| 4 | 2 | 1 |
| 5 | 1 | 5 |
| 6 | 7 | 6 |
| 7 | 5 | 7 |
| 8 | 10 | 8 |
| 9 | 8 | 9 |
| 10 | 12 | 10 |
| 11 | 11 | 11 |
| 12 | 13 | 12 |
| 13 | 9 | 13 |
| 14 | 14 | 14 |
| 15 | 15 | 15 |
| 16 | 16 | 16 |
| 17 | 18 | 17 |
| 18 | 17 | 18 |

Proposer des alternatives au décideur

[Levrat, *et al.*, 2008]

Exploiter un critère de performance [Iung, *et al.*, 2007]

Réagir à l'annonce d'un nouvel arrêt [Levrat, *et al.*, 2007]

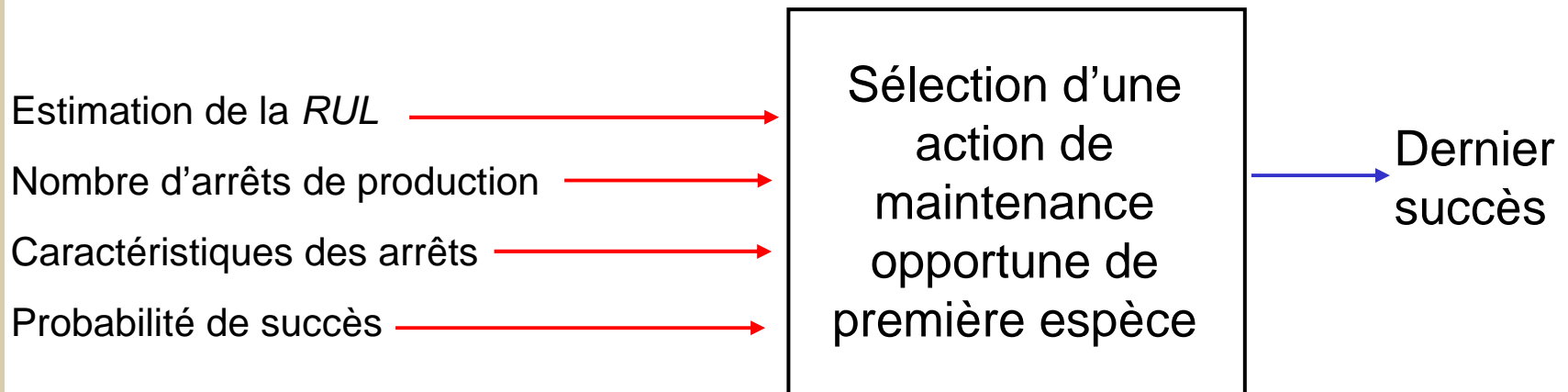
Introduire des seuils pour exclure des alternatives *a priori* rédhibitoires [Thomas, *et al.*, 2008]

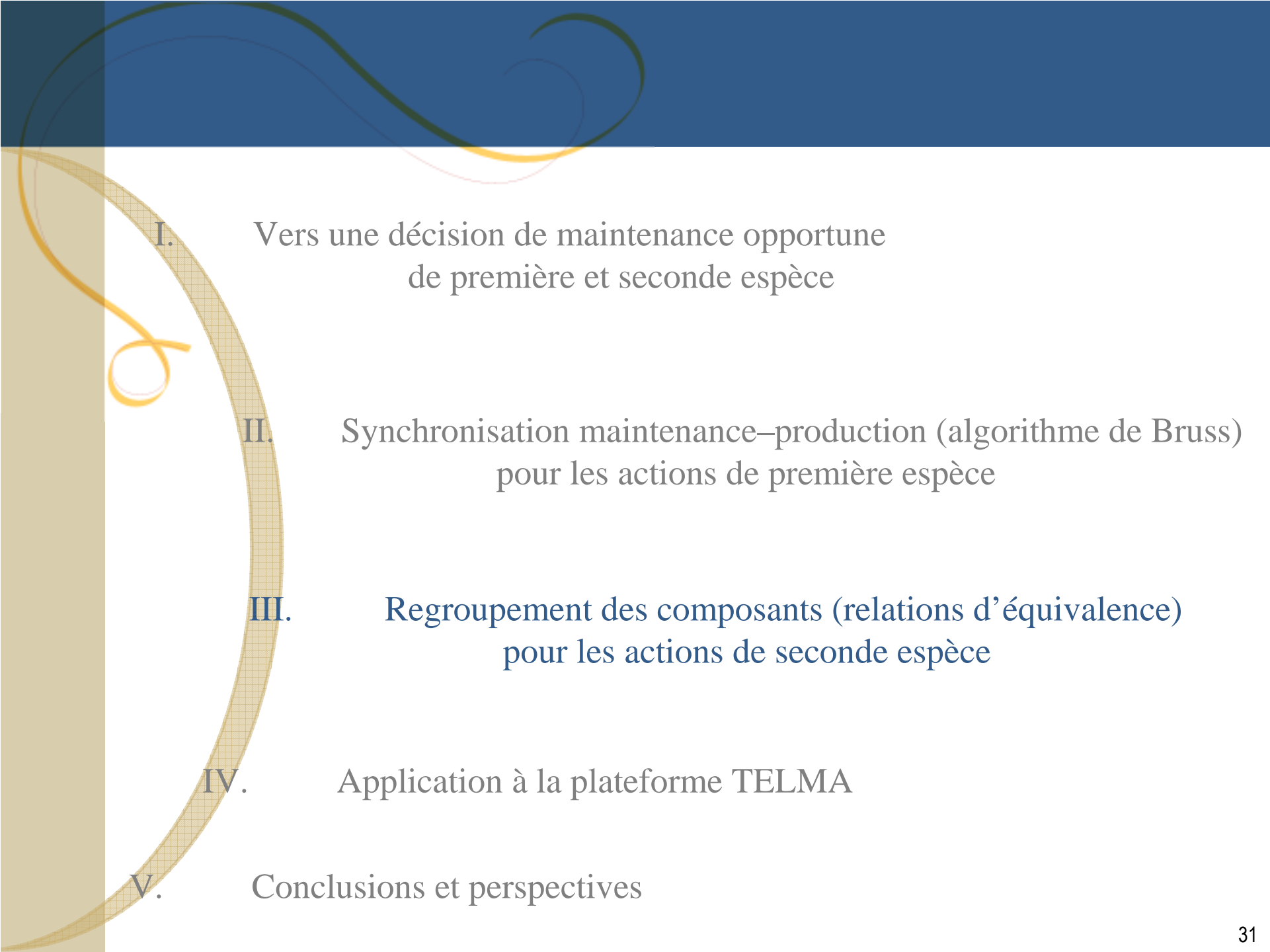
Synthèse de la problématique

Algorithme adapté aux exigences des stratégies prévisionnelles

Permet de synchroniser la maintenance et la production

Prouvé optimal pour la recherche du dernier succès



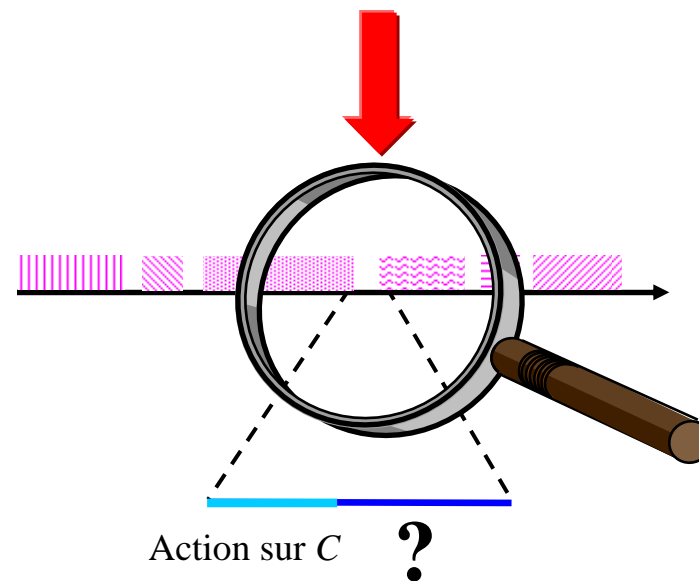
- 
- I. Vers une décision de maintenance opportune de première et seconde espèce
 - II. Synchronisation maintenance–production (algorithme de Bruss) pour les actions de première espèce
 - III. Regroupement des composants (relations d'équivalence) pour les actions de seconde espèce
 - IV. Application à la plateforme TELMA
 - V. Conclusions et perspectives

Sélection d'actions de maintenance C-opportunes de seconde espèce

(Q3) Comment investiguer de nouvelles actions de maintenance préventive sur l'espace de proactivité à partir d'une intervention sur le composant dégradé C ? Sur la base de quels critères ?

Sélection d'actions de maintenance C-opportunes de seconde espèce

(Q3) Comment investiguer de nouvelles actions de maintenance préventive sur l'espace de proactivité à partir d'une intervention sur le composant dégradé C ? Sur la base de quels critères ?



Heuristique : les actions C -opportunes de seconde espèce privilégient les composants qui partagent avec C des propriétés communes.

Les relations d'équivalence pour modéliser les propriétés partagées

Propriétés communes :

- nécessiter un même outillage, mêmes compétences
- nécessiter les mêmes règles de consignation–déconsignation
- participer à une même finalité
- appartenir à une même enceinte
- être proche (notion « géographique » graduelle)



Par des relations d'équivalence

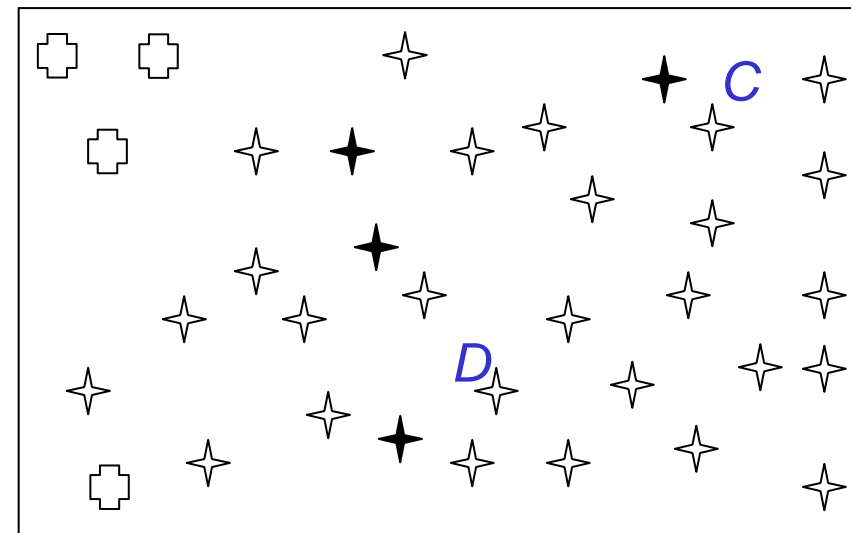
- *réflexive*
- *symétrique*
- *transitive*

Approche « universelle » (critères binaires et graduels)

Les relations d'équivalence adaptées à l'outillage

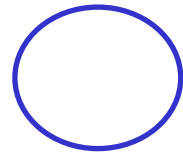
Relation d'outillage-compétence : D est accessible depuis C pour l'opérateur de maintenance W s'il existe une procédure ne faisant intervenir que ses compétences et les outils à sa disposition lui permettant d'accéder à D à partir de C .

- ✦ Composant mécanique du système
- ✦ Composant de référence
- ⊕ Composant électrique



Représentation schématique du système

Les relations d'équivalence adaptées à l'outillage



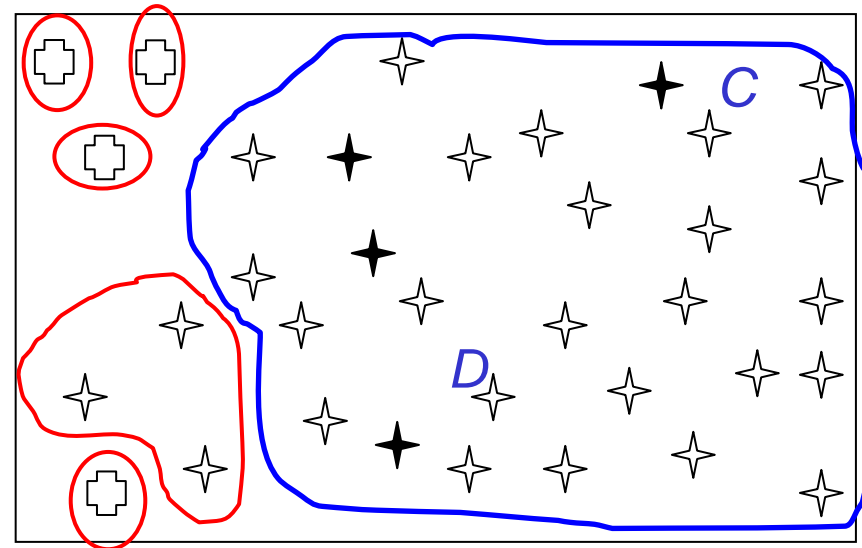
Classe des composants accessibles pour W



Classes des composants inaccessibles pour W

D appartient à la classe de C :
action C -opportune de
seconde espèce
(regroupement possible)

Démarche générique
(s'applique de même aux
autres critères, sauf pour le
cas de la proximité)

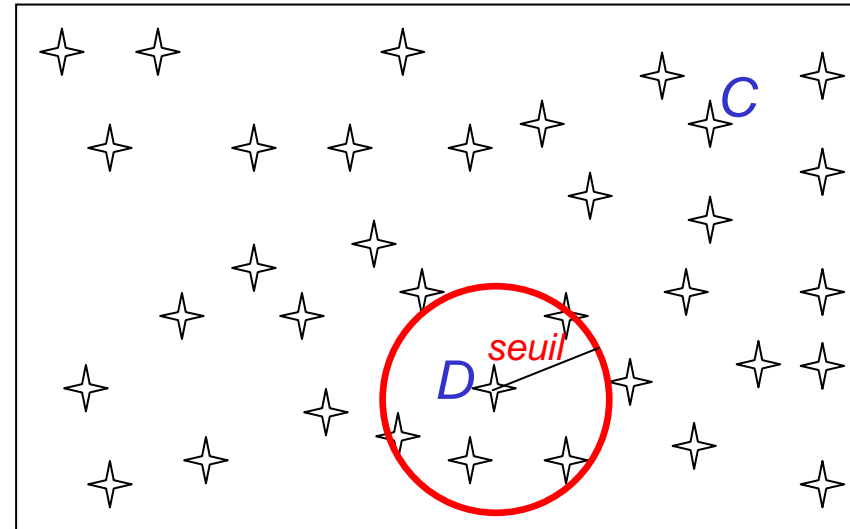


Partition du système par la relation d'outillage
pour l'hydraulicien W

La proximité

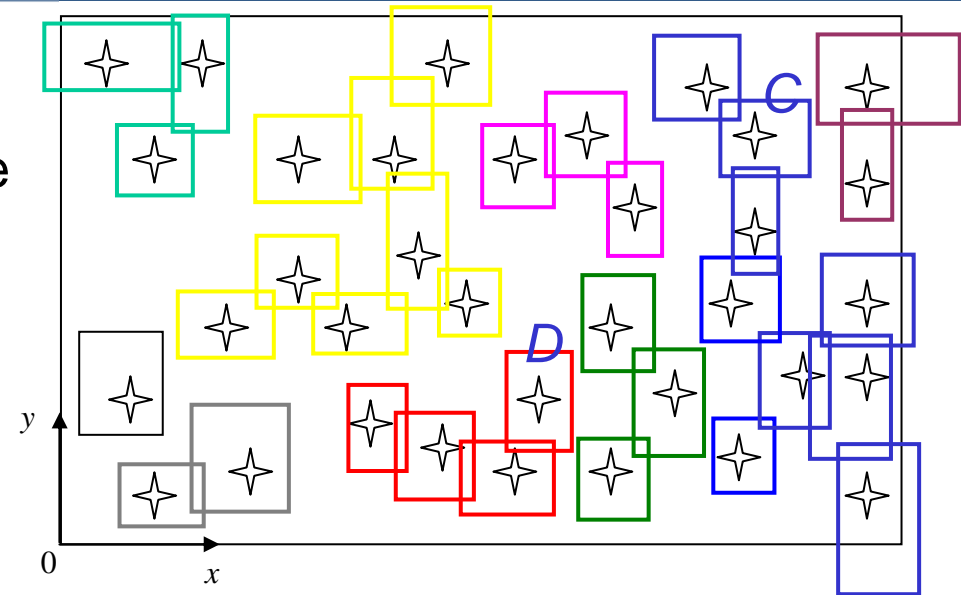
Problème : la notion de proximité

- comment la mesurer ?
- notion relative et graduelle
- si D et E sont proche de C , lequel est plus proche de C que l'autre ?



La distance usuelle, booléenne,
ne répond pas aux contraintes

- Relation d'équivalence
- Prise en compte de la structure de chaque composant
- S'obtient facilement (données de la CAO)
- Difficilement exploitable (exige données très précises)



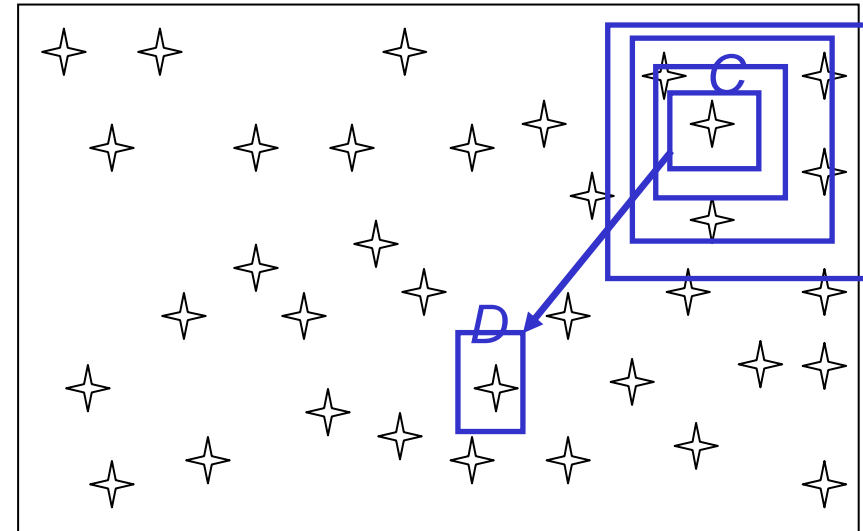
L'exploitation directe de boîtes englobantes répond aux contraintes (relation d'équivalence), mais ne fournit pas une notion graduelle

Première approche :

Boîtes englobantes (D proche de C s'il existe une suite de boîtes englobantes deux à deux d'intersection non vide qui mènent de D à C)

La proximité

- Relation d'équivalence
- Prise en compte de la structure de chaque composant
- S'obtient facilement (données de la CAO)
- Difficilement exploitable (exige données très précises)



Peut-on construire une définition qui soit graduelle ?

Première approche :

Boîtes englobantes (D proche de C s'il existe une suite de boîtes englobantes deux à deux d'intersection non vide qui mène de D à C)

Deuxième approche (plus réaliste) :

Construction d'une fonction graduelle (utilisation des **seules** boîtes englobantes de C et D)

Proximité : formalisation

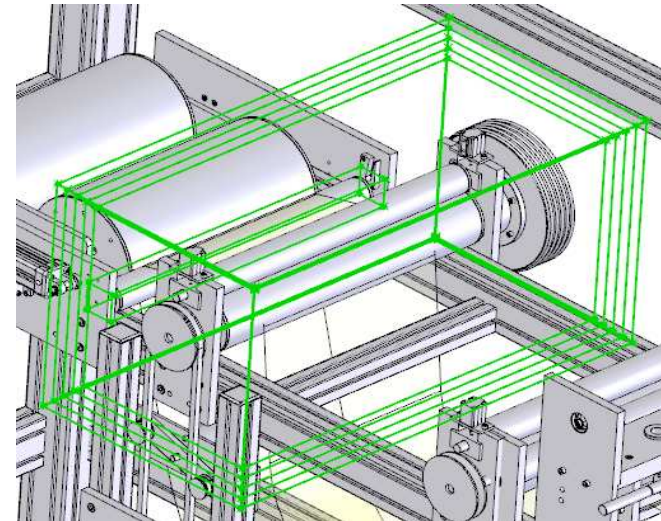
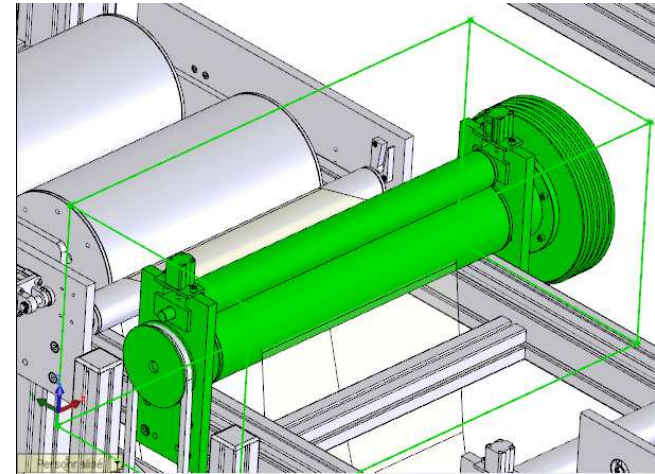
Construction des boîtes englobantes

Utilisation des données de conception

B_C^0 boîte englobante autour de C

On fait croître uniformément la boîte englobante de C (boîtes B_C^α) jusqu'à ce qu'elle entre en contact avec celle de D , on en déduit l'*indice de contact*

$$\alpha_{\min}^{C \rightarrow D} = \inf \{ \alpha \geq 0 \mid B_C^\alpha \cap B_D^0 \neq \emptyset \}.$$



Proximité : formalisation

Construction des boîtes englobantes

Utilisation des données de conception

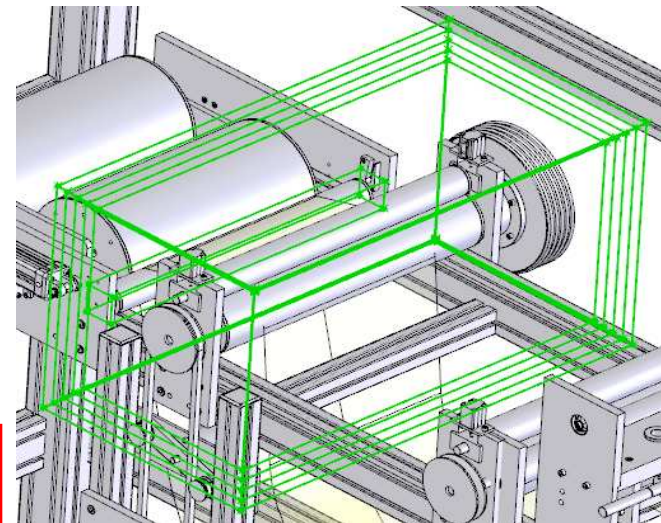
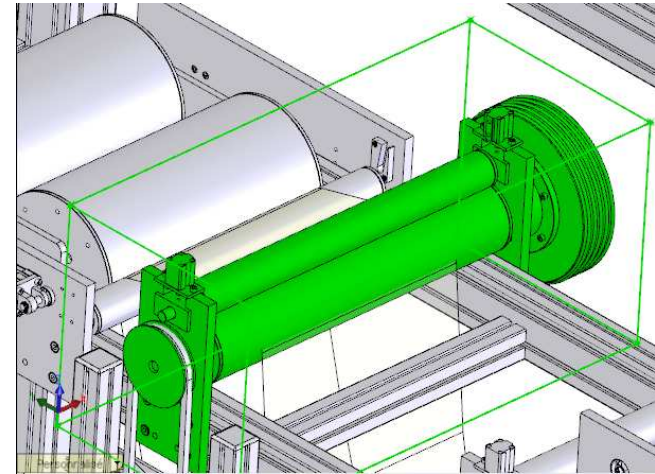
B_C^0 boîte englobante autour de C

On fait croître uniformément la boîte englobante de C (boîtes B_C^α) jusqu'à ce qu'elle entre en contact avec celle de D , on en déduit l'*indice de contact*

$$\alpha_{\min}^{C \rightarrow D} = \inf \{ \alpha \geq 0 \mid B_C^\alpha \cap B_D^0 \neq \emptyset \}$$

On fait croître uniformément B_C^0 jusqu'à ce qu'elle englobe celle de D , on en déduit l'*indice d'absorption*

$$\alpha_{\max}^{C \rightarrow D} = \inf \{ \alpha \geq 0 \mid B_C^\alpha \supseteq B_D^0 \}$$



Mesure de proximité graduelle

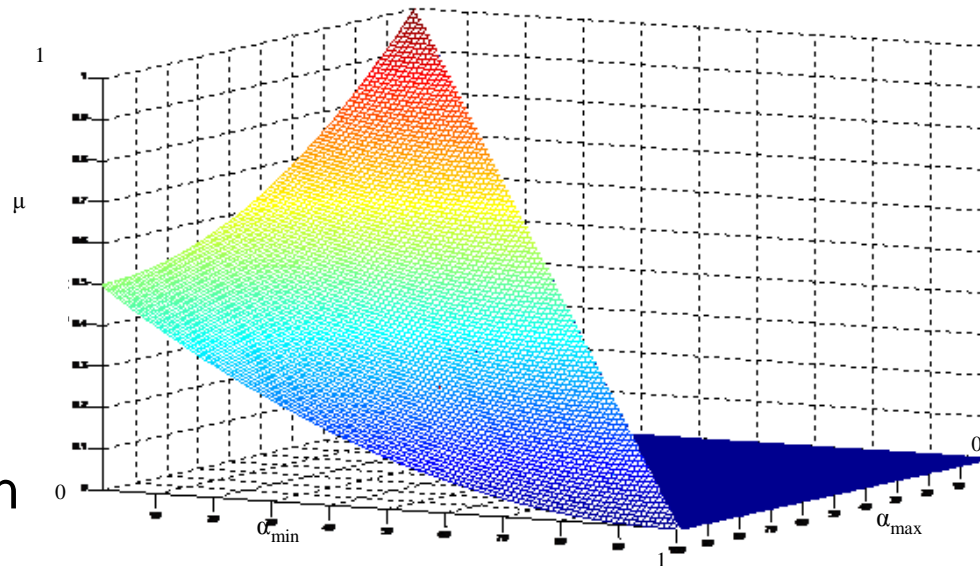
Favorise les composants « ramassés »

Favorise les composants « proches » (sens euclidien)

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

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

Le décideur peut définir un
seuil minimal sur μ pour
discriminer les composants



Graphe de la fonction d'appartenance

Agrégation des critères

| Composants Relation | C | D | E | ... |
|--------------------------------------------|----------|----------|----------|-----|
| Proximité | 1 | 0 | 1 | ... |
| Être lié par un flux | 1 | 1 | 0 | ... |
| Participer à une même fonction | 1 | 1 | 0 | ... |
| Posséder la même gamme de consignation | 1 | 0 | 1 | ... |
| Nécessiter les mêmes outils et compétences | 1 | 1 | 1 | ... |

- Compter le nombre de classes en commun
- Pondérer en fonction des préférences
- Tableau construit *a priori* ; peut être stocké dans une base de données

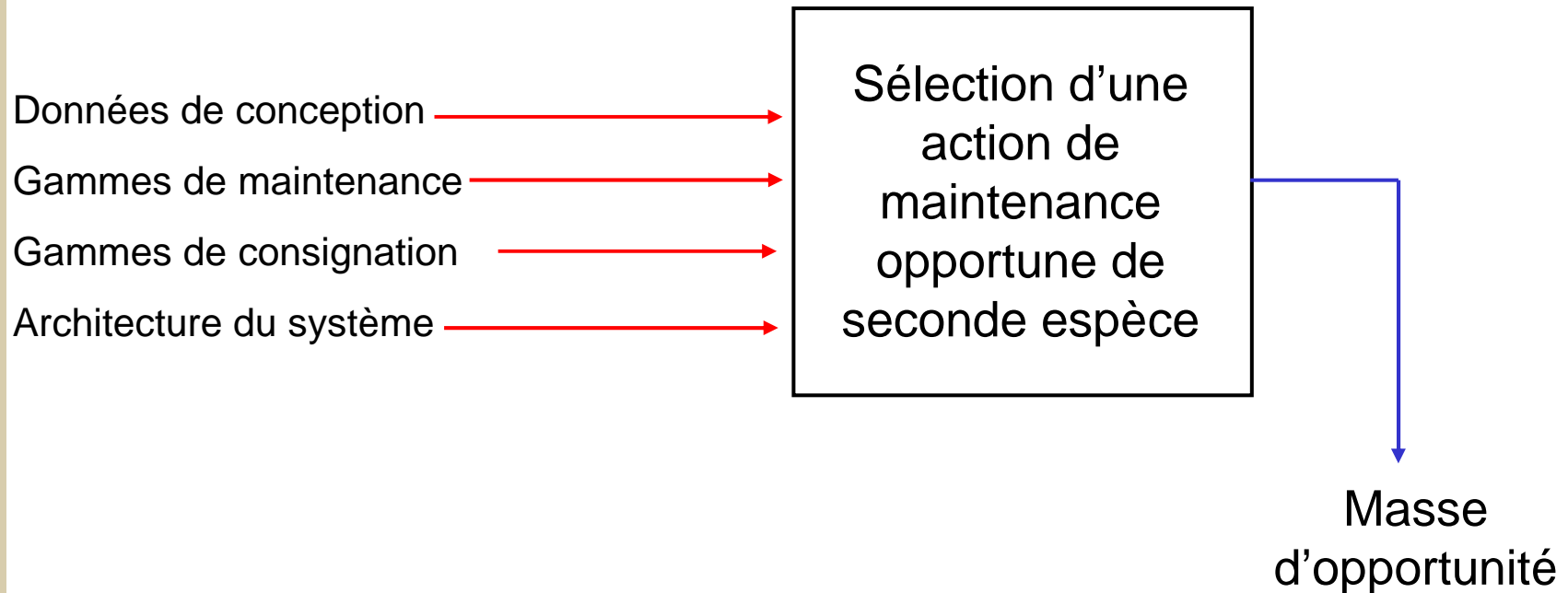
Regroupement optimal pour une masse d'opportunité maximale

Synthèse de la problématique

Formalisme adapté aux exigences des stratégies prévisionnelles

Permet d'investiguer des actions préventives non planifiées

La démarche adoptée pour la proximité pourrait s'adapter à d'autres critères





I. Vers une décision de maintenance opportune
de première et seconde espèce

II. Synchronisation maintenance–production (algorithme de Bruss)
pour les actions de première espèce

III. Regroupement des composants (relations d'équivalence)
pour les actions de seconde espèce

IV. Application à la plateforme TELMA

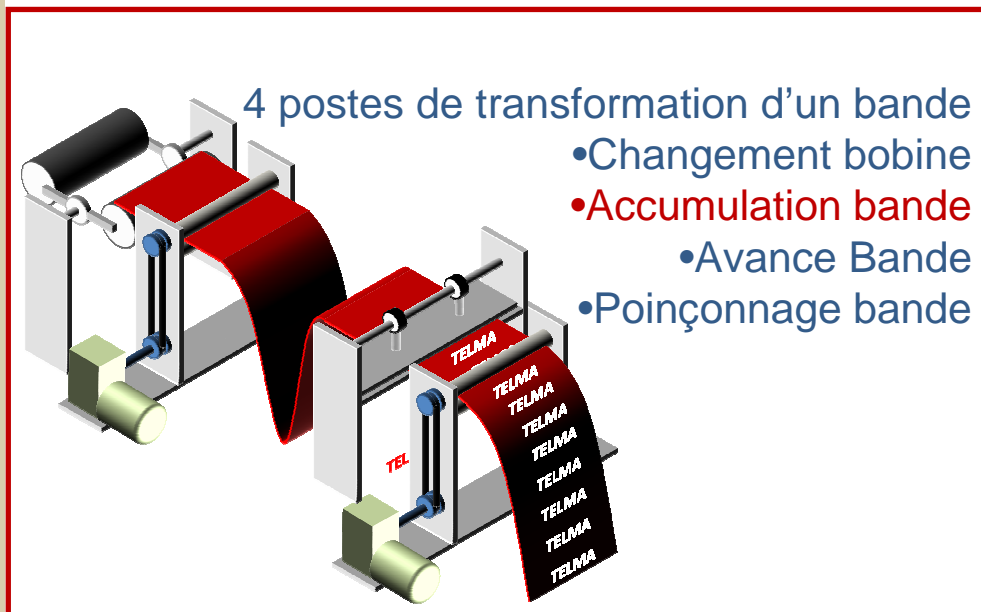
V. Conclusions et perspectives

La plateforme TELMA



Plate forme d'Enseignement et de Recherche (AIPL)

- Nouvelles formes de maintenance
- Processus et environnement industriels
 - Autonome (24/24h)
 - Accessible à distance
- Mode d'utilisation local, en continu

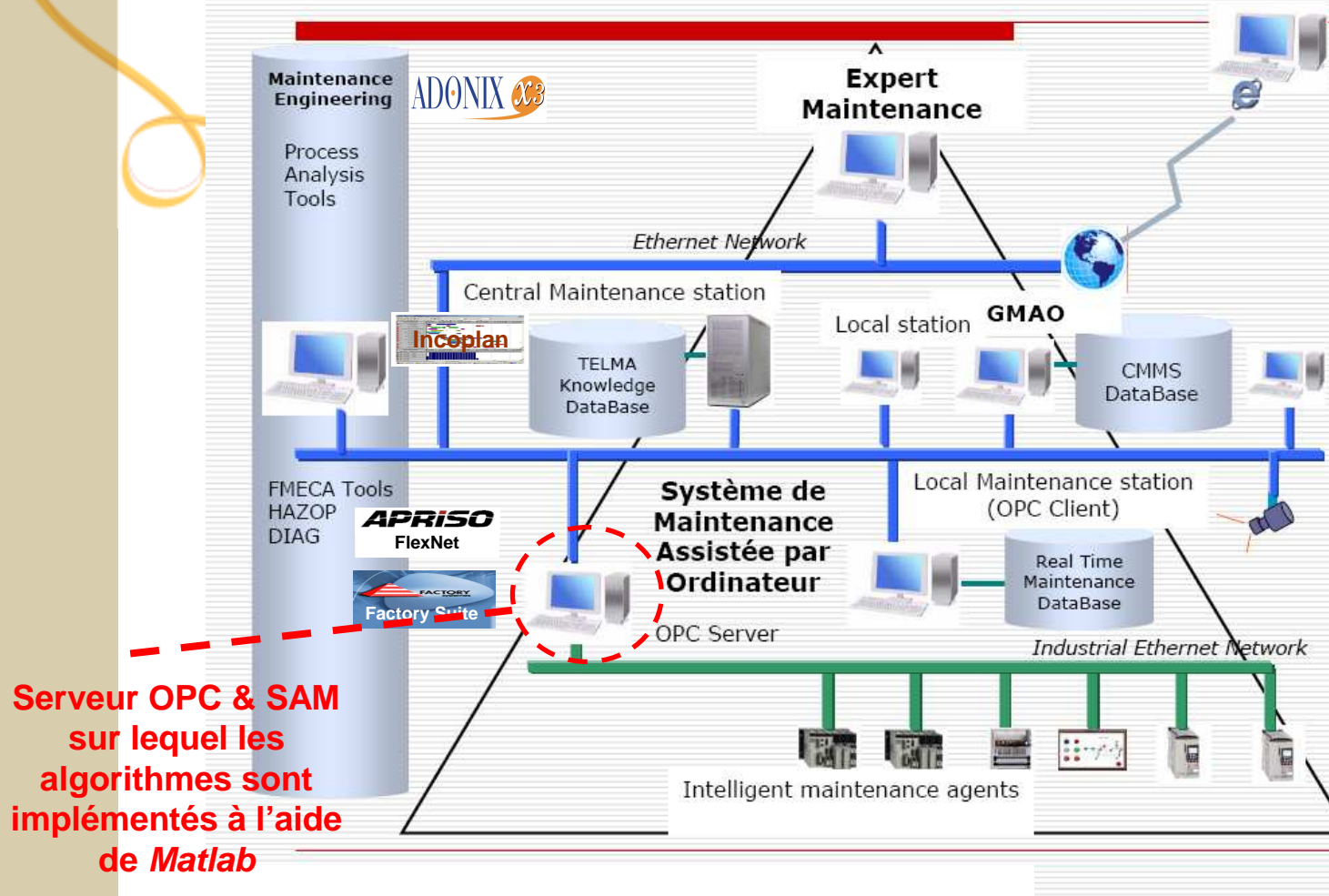


- Emboutissage de tôles
- Exploitation de l'existant
- Données réelles

Architecture de communication et de maintenance

Architecture de Maintenance

Intégration au sein de l'A IPL



Objectifs et scénario (maintenance opportune de première espèce)

Objectifs :

Montrer la faisabilité des approches opportunes de première et seconde espèce

Amener une modification des pratiques de la maintenance sur TELMA

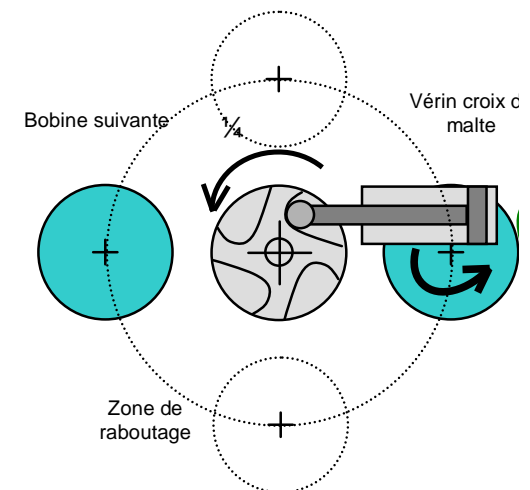
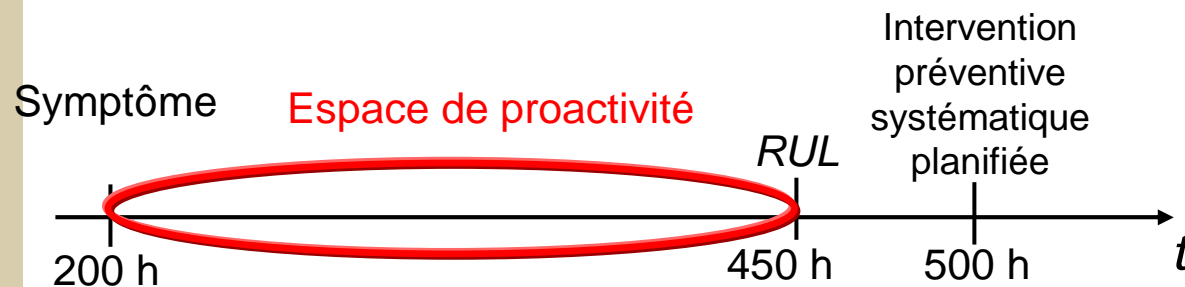
Scénario :

Observation d'une dégradation sur le vérin (composant surveillé)

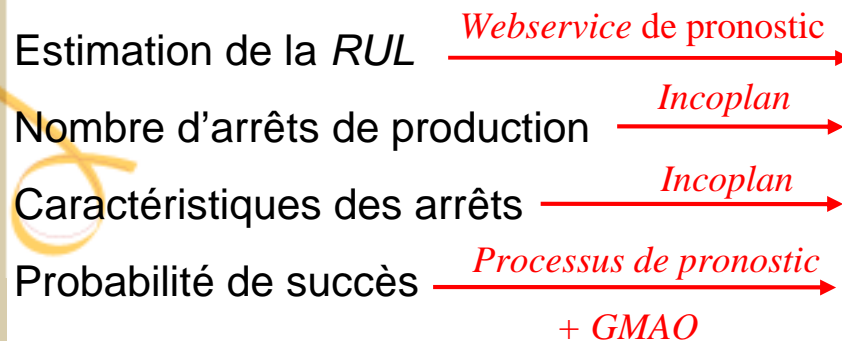
Symptôme : augmentation du temps de sortie

Actions possibles :

inspection (fuite externe), lubrification, remplacement



Obtention des données

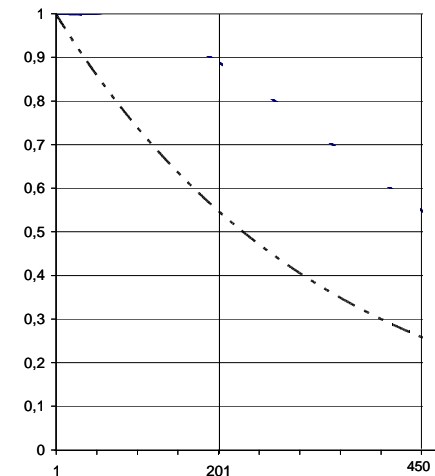


Sélection d'une
action de
maintenance
opportune de
première espèce

→ Arrêt 7

Critère de performance retenu : le vérin développe une force statique supérieure à 600 N (connaissance probabiliste *via* pronostic)

Maintenabilité :
fonction exponentielle de paramètre $1,5 \text{ h}^{-1}$



Extraction de la liste des arrêts programmés de la base d'*Incoplan*
13 arrêts de production planifiés de 200 h à 450 h

| Numéro | Date de début (h) | Durée (min) |
|--------|-------------------|-------------|
| 1 | 200 | 45 |
| 2 | 210 | 30 |
| 3 | 230 | 60 |
| 4 | 235 | 30 |
| 5 | 250 | 15 |
| 6 | 256 | 60 |
| 7 | 310 | 60 |
| 8 | 320 | 30 |
| 9 | 400 | 15 |
| 10 | 420 | 15 |
| 11 | 425 | 45 |
| 12 | 430 | 30 |
| 13 | 480 | 75 |

Génération automatique d'un ordre de travail par requête SQL

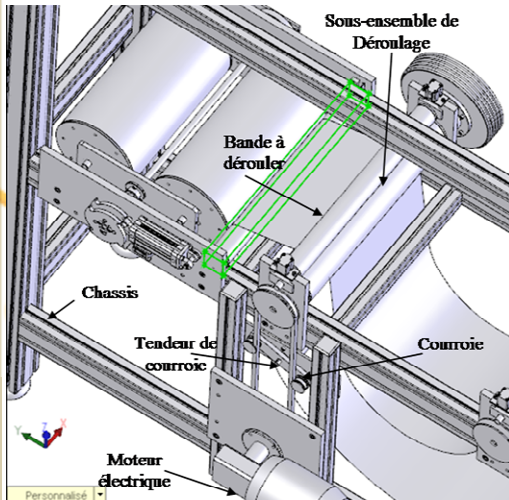


| Numéro | Date de début (h) | Durée (min) |
|--------|-------------------|-------------|
| 1 | 200 | 45 |
| 2 | 210 | 30 |
| 3 | 230 | 60 |
| 4 | 235 | 30 |
| 5 | 250 | 15 |
| 6 | 256 | 60 |
| 7 | 310 | 60 |
| 8 | 320 | 30 |
| 9 | 400 | 15 |
| 10 | 420 | 15 |
| 11 | 425 | 45 |
| 12 | 430 | 30 |
| 13 | 480 | 75 |

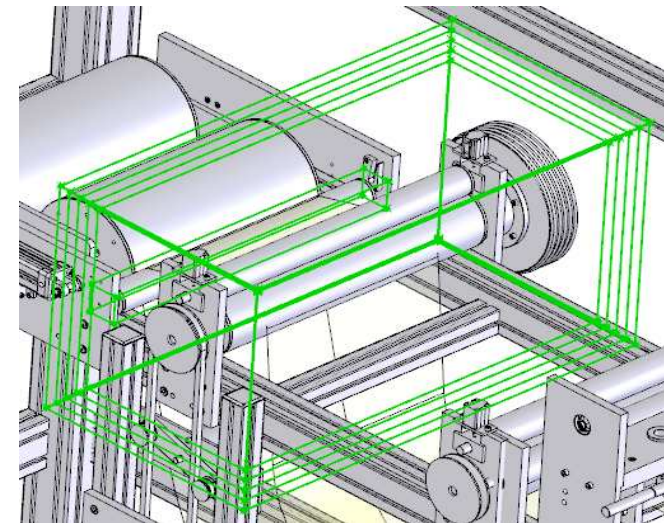
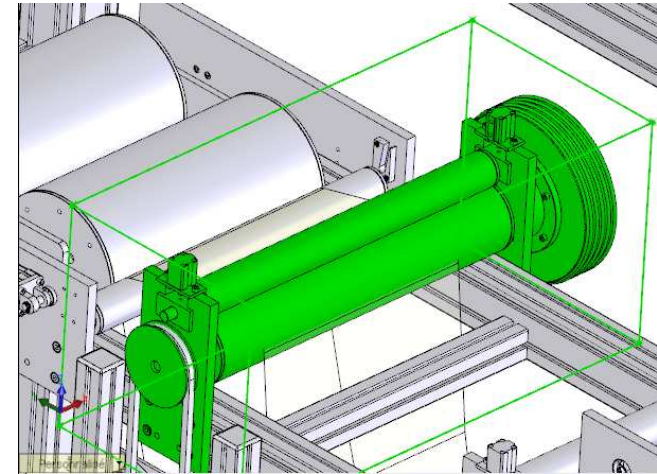
| Classement | Arrêt retenu | Probabilité de gain | Décision |
|------------|--------------|---------------------|-----------------|
| 1 | 7 | 0,4020 | Optimale |
| 2 | 6 | 0,4028 | Non optimal |
| 3 | 13 | 0,3997 | Non optimal |
| 4 | 4 | 0,4012 | Non optimal |
| 5 | 3 | 0,4098 | Non optimal |
| 6 | 2 | 0,4024 | Non optimal |
| 7 | 1 | 0,4081 | Non optimal |

A permis de réduire le nombre d'interventions sur le vérin

Illustration du concept de proximité



Recherche de composants « proches » du sous-ensemble d'accumulation



SolidWorks

- Modélisation 3D (arborescence)
- Extraction des boîtes englobantes
- Exportation sous format tableur
- Stockage non réalisable (*OptiMaint*)

Application externe

- Extension des boîtes
- Calcul des indices pour un composant donné et ses voisins

| <i>Sous-ensemble d'accumulation</i> | $\alpha_{\min}^{Acc \rightarrow \bullet}$ | $\alpha_{\max}^{Acc \rightarrow \bullet}$ |
|-------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Courroie | 0 | 390 |
| Tendeur | 4 | 122 |
| Moteur d'accumulation | 174 | 424 |
| Moteur d'avance | 728 | 1126 |
| Châssis plateforme TELMA | 0 | 1187 |

Unité : millimètre

Intégration des contributions au sein d'un système proche d'une réalité industrielle

Approche dynamique

Problème actuel du stockage de données (conception...) au sein d'une GMAO

Démarche adaptée à une investigation « locale » de composants dégradés

Les objets proches et ramassés sont privilégiés

| <i>Sous-ensemble d'accumulation</i> | $\mu(Acc; \bullet)$ |
|-------------------------------------|---------------------|
| Courroie | 0,73 |
| Tendeur | 0,90 |
| Moteur d'accumulation | 0,66 |
| Moteur d'avance | 0,11 |
| Châssis plateforme TELMA | 0,50 |

Valeur limite ajustable

(Q1) La maintenance prévisionnelle exploite-t-elle, par ses aspects anticipatif et proactif, des opportunités ? Lesquelles ?

- **Étude de la notion d'opportunité**
- **Proposition d'un concept adapté au cadre prévisionnel**
- **Méthode d'investigation systématique des opportunités**

(Q2) Sur l'espace de proactivité, quels instants privilégier pour la maintenance de sorte à exploiter au maximum le composant et à minimiser l'impact sur la production ?

Synchronisation maintenance–production (maintenance opportune de première espèce)

(Q3) Comment investiguer de nouvelles actions de maintenance préventive sur l'espace de proactivité à partir d'une intervention sur le composant dégradé C ? Sur la base de quels critères ?

- **Regrouper les actions par propriétés communes (maintenance opportune de seconde espèce)**
- **Recherche systématique**
- **Construction d'une masse d'opportunité**
- **Illustration partielle sur un exemple industriel**

- Intégration de l'incertitude portant sur la distribution de la durée de vie résiduelle
- Adaptation à l'incertitude sur les arrêts de production
- Intégration de critères logistiques

- Obtenir des mesures floues pour tous les critères
- Intégration de critères économiques
- Poursuivre l'étude des masses d'opportunisme (propriétés, structure...)
- Prise en compte de l'incertitude sur la durée des arrêts pour l'investigation de candidats à une intervention opportune de seconde espèce

Édouard THOMAS

Contribution à la prise de décision dynamique en maintenance prévisionnelle par formalisation d'un principe d'opportunité

Je vous remercie pour votre attention !

Centre de recherche en automatique de Nancy

Unité mixte de recherche CNRS - Nancy-Université

Faculté des Sciences et Techniques BP 239

Vandœuvre-lès-Nancy F-54506 France



Nancy-Université