Système d'aide à la décision pour la génération des processus d'inspection par la fédération des expertises métier

Shirin Mirdamadi

▶ **To cite this version:**

Shirin Mirdamadi. Système d'aide à la décision pour la génération des processus d'inspection par la fédération des expertises métier. Autre. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2014. Français. NNT : 2014ENAM0023 . tel-01077940

HAL Id: tel-01077940

https://pastel.hal.science/tel-01077940

Submitted on 27 Oct 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

2014-ENAM-0023

École doctorale n°432 : SMA-Sciences des Métiers d e l'ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Génie Industriel "

présentée et soutenue publiquement par

Shirin MIRDAMADI

le 4 Septembre 2014

Système d'aide à la décision pour la génération des processus d'inspection par la fédération des expertises métier

Directeur de thèse : **Jean-Yves DANTAN**
Co-encadrement de la thèse : **Lionel ROUCOULES, Ali SIADAT, Lionel MARTIN**

Jury

M. Benoît IUNG, Professeur, CRAN, Université Henri Poincaré, Nancy	Président
M. Maurice PILLET, Professeur, SYMME, Université de Savoie, Annecy	Rapporteur
M. Luc MATHIEU, Professeur, LURPA, Université Paris-Sud	Rapporteur
M. Jean-Régis HADJI-MINAGLOU, Professeur, Université du Luxembourg	Examinateur
M. Jean-Yves DANTAN, Professeur, LCFC, Arts et Métiers Paris Tech, Metz	Examinateur
M. Ali SIADAT, Maître de conférences, LCFC, Arts et Métiers Paris Tech, Metz	Examinateur
M. Lionel ROUCOULES, Professeur, LSIS, Arts et Métiers Paris Tech, Aix-en-Provence	Examinateur
M. Lionel MARTIN, Docteur agrégé, LSIS, Arts et Métiers Paris Tech, Aix-en-Provence	Examinateur
M. Stéphane HUBAC, Manufacturing Science Senior Expert, STMicroelectronics, Crolles	Invité

Arts et Métiers ParisTech - Centre de Metz
Laboratoire de Conception Fabrication Commande

T H È S E

À mes parents…

Remerciements

Mes profonds remerciements vont tout d'abord à M. Patrick MARTIN, pour m'avoir donnée l'occasion d'intégrer l'ENSAM et plus particulièrement le laboratoire LCFC.

Je remercie et avec beaucoup de sincérité je voudrais remercier mon directeur de thèse, Jean-Yves DANTAN, pour m'avoir accueillie au sein de son équipe de recherche, pour sa pédagogie, sa disponibilité, et ses qualités scientifiques. Sa relecture soignée de ce manuscrit m'a permis de préciser mon propos. J'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse ma gratitude.

Je remercie Ali SIADAT, d'avoir encadré ce travail. Je lui suis très reconnaissante pour ses conseils prépondérants pour ce travail, son écoute, sa confiance et sa sympathie qu'il est difficile de trouver ailleurs. J'ai pris un grand plaisir à travailler avec lui. J'adresse de chaleureux remerciements à mon deuxième encadrant de thèse, Lionel ROUCOULES, pour ses capacités d'analyse et très nombreuses connaissances, qui ont favorisé le bon déroulement de ce travail, et aussi pour son énergie qui rendait le travail un plaisir. Je remercie mon plus jeune encadrant, Lionel MARTIN, pour le temps passé à encadrer mes travaux, pour sa franchise et ses remarques toujours très pertinentes qui m'ont été très précieuses, et aussi pour son calme et sa gentillesse.

J'adresse également mes remerciements très particuliers à l'ensemble des membres de jury pour leurs points de vue si précieux, pour leurs intérêts à l'égard de mes travaux, et pour les perspectives enrichissantes qu'ils ont proposé pour en étendre les applications. Je remercie sincèrement M. Maurice PILLET de m'avoir fait l'honneur d'être le rapporteur de ce travail, et de ses précieux conseils aussi bien scientifiques que techniques, (et d'avoir si bien résumé mon sujet de thèse avec l'exemple de thermomètre). Je remercie M. Luc MATHIEU d'avoir lu si minutieusement mon manuscrit, et de ses remarques qui m'ont grandement éclairée.

Je remercie également M. Benoit IUNG d'avoir présidé mon jury de thèse, et d'avoir accepté d'évaluer ce travail. Un grand merci à M. Jean-Régis HADJI-MINAGLOU d'avoir accepté d'être l'examinateur de ce travail, et de sa patience et ses corrections de mes fautes de français désastreusement nombreuse ! Je souhaite également remercier M. Stéphane HUBAC d'avoir accepté d'assister à ma soutenance de thèse, et d'avoir apporté ce qui manquait à ce travail, c'est-à-dire un point de vue industriel tout à fait pertinent. J'ai été très honoré de soutenir mes travaux devant un tel jury.

Je remercie tous ceux que j'ai pu côtoyer ces dernières années, à l'ENSAM de Metz, les doctorants, et plus particulièrement les collègues du bureau B148 pour l'ambiance géniale de travail, et leur soutien parfois silencieux dans mes moments de doute. Alain, Xavier, Amir, Jawad, … merci.

Mes remerciements vont aussi à Florent pour son enthousiasme, qui avait quand même parfois des bas, et sa question de ces derniers mois « c'est quand que tu termine ta thèse ? ». Merci de m'avoir soutenue, supportée, et encouragée.

Et enfin je remercie ma mère, ma grand-mère, Sara, Sami, Olivier, pour leur affection, leur présence, et leur soutien sans faille. Sans vous je n'en serais pas là aujourd'hui.

Et une pensée à mon papa pour qui notre avenir comptait tant mais qui est absent aujourd'hui pour que je lui dise merci pour toutes les bonnes valeurs qu'il nous a transmises.

Merci encore à tous

Glossaire

ABC : Activity Based Tolerance Allocation.

ABTA : Activity Based Tolerance Allocation - Traduction : Allocation de tolérances basée sur le concept d'activités (Etienne 2007).

ACDE : Analyse de la Causalité, des Défaillances, et de leurs Effets.

Activité : Ensemble distinct d'actions identifiées, observable en tant que tel, et exécutées par une ou plusieurs ressource, qui transforme des éléments d'entrée en éléments de sortie.

AMDEC : Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité.

AOQL : Average Outgoing Quality Limit.

C.A.I. : Couvercle d'Arbre Intermédiaire.

CAIP : Computer Aided Inspection Planning.

Capabilité : Aptitude d'un procédé ou processus, selon la conception de la pièce ou du produit à respecter les tolérances fixées par le cahier des charges.

CAPP : Computer Aided Process Planning

Caractéristiques Clé (Key Characteristic) : Propriétés clés du produit, du processus de fabrication et des ressources qui affectent de manière significative le coût final, l'exécution, ou la sûreté du produit quand les KCs changent de cibles (Thornton 1999).

CAT : Computer Aided Tolerancing.

CCP : Capabilité Composite du Processus

Connaissance métier : « Constituée de la somme des connaissances et de l'expérience nécessaire pour faire fonctionner le système, en vue d'atteindre des objectifs technico-économiques donnés et ce compte tenu des contraintes liées à l'environnement » (China 1997).

Coût : Dépense engagée due à la consommation des ressources par des activités réalisant le produit.

Défaillance : Cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise.

DFM : Design For Manufacturing

Efficacité : Rapport entre les résultats obtenus et les objectifs fixés.

Efficience : Rapport entre les résultats obtenus et les ressources utilisées pour les atteindre.

Exigence : Demande formelle, exprimée en terme qualitatif et/ou quantitatif de provenance externe (par exemple l'expression des besoins d'un client) ou interne (par exemple exigences propres à un métier) (Etienne 2007).

Fonction : Action ou réaction d'un produit ou de l'un de ses composants, exprimée exclusivement en termes de finalité. La totalité des fonctions décrit l'usage attendu du produit.

Gamme de fabrication : Ordre chronologique de l'ensemble des opérations d'usinage, d'assemblage, et de mise en position réalisant les différentes pièces composant, et le produit.

Indicateur de performance : Une donnée quantifiée qui exprime l'efficacité et / ou l'efficience de tout ou partie d'un système (réel ou simulé), par rapport à une norme, un plan déterminé et accepté dans le cadre d'une stratégie d'entreprise (objectif stratégique) (LeDain & Ndao 1997).

Inspection : L'ensemble des activités de vérification de la conformité du produit et de ses composants au regard du cahier des charges, et de l'aptitude du processus de fabrication.

Métrologie : « Le champ des connaissances concerné par la mesure », à propos de l'amplitude d'une quantité (ISO/DIN 2012).

MSDD : Manufacturing system design decomposition

MSP : Maîtrise statistique des procédés

Pertinence : Compatibilité des ressources allouées et leurs critères de performances vis-à-vis de l'objectif

Pièce : Composant mécanique du produit.

Procédé : Moyen ou activité appliqué au produit, qui en modifie les caractéristiques.

Processus : Un processus est une organisation séquentielle, spatiale et hiérarchique d'activités faisant appel à des ressources et conduisant à des produits (Labrousse 2004).

Produit : Ensemble de composants reliés entre eux et travaillant ensemble pour fournir les fonctions attendues par le client.

QFD : Quality Function Development

Qualité : « Le jugement et l'appréciation du bénéficiaire (interne ou externe à l'entreprise, le client, les acteurs et toutes les parties prenantes), basé sur son expérience au regard de ses besoins et attentes, exprimés ou non, conscients ou intuitifs, techniques ou subjectifs » (Delvosalle 2002).

Rebut : Produit ou composant du produit ayant fait l'objet d'une décision de destruction parce qu'il n'est pas conforme aux exigences fonctionnelles demandées et qu'il est, de ce fait, inutilisable et irrécupérable.

Risque : La probabilité qu'une défaillance ou une anomalie se présente au niveau du produit ou du processus.

Spécification : Condition sur une caractéristique.

TAFT : Tableau d'Analyse Fonctionnelle Technique.

Tolérance : Limites tolérées par une caractéristique.

TQM : Total Quality Management

Variation : Phénomène tel que la valeur prise par une caractéristique n'est pas constante ou unique.

Table des matières

Glossaire ..... *- 7 -*

Table des matières ..... *- 11 -*

Table des figures ..... *- 13 -*

Table des tableaux ..... *- 15 -*

Introduction ..... *- 19 -*

Chapitre I - Contexte, vue globale des pratiques industrielles actuelles ..... *- 25 -*

1. Introduction ..... *- 26 -*
1.1. Les concepts ..... - 26 -
1.2. Les objectifs opérationnels de l'inspection ..... - 31 -
1.3. Les objectifs stratégiques de l'inspection ..... - 33 -
1.4. Revue des champs de recherche en inspection, Coût Vs. Qualité ..... - 35 -
1.5. Positionnement de l'activité de planification des inspections dans le processus de maîtrise des variations ..... - 37 -
1.5.1. Allocation des tolérances de produit et conception préliminaire du processus de fabrication ..... - 38 -
1.5.2. Conception détaillée de processus de fabrication et allocation des ressources ..... - 38 -
1.5.3. Génération de plans d'inspection et allocation des ressources ..... - 39 -
1.5.4. L'intégration en conception ..... - 40 -

2. Complexité et problématique du travail de recherche ..... *- 42 -*

3. Conclusion ..... *- 45 -*

Chapitre II – Etat de l'art, expérimentation, et synthèse ..... *- 47 -*

1. Les exigences et critères d'analyse de l'état de l'art ..... *- 48 -*

2. Vue globale des approches, méthodes, et outils de la littérature ..... *- 51 -*

3. Détails des approches, méthodes, et outils de la littérature ..... *- 55 -*
3.1. T.A.F.T. ..... - 57 -
3.2. AMDEC ..... - 58 -
3.3. QFD ..... - 61 -
3.4. Matrice d'impact ..... - 65 -
3.5. Capabilité ..... - 68 -
3.6. Le tolérancement inertiel et la capabilité inertielle ..... - 70 -
3.7. Indicateur hybride ..... - 71 -
3.8. Modèles et méthodes d'estimation des coûts (de la qualité, et du risque) ..... - 73 -
3.8.1. Modèles et méthodes d'estimation des coûts de la qualité ..... - 73 -
3.8.2. Modèles et méthodes d'estimation des coûts des risques, CbFMEA ..... - 80 -
3.9. Key Characteristic Flowdown ..... - 80 -
3.10. Arbre de causes ..... - 82 -
3.11. ABTA ..... - 82 -

4. Synthèse des approches, méthodes, et outils de la littérature ..... *- 83 -*

5. Conclusion ..... *- 87 -*

Chapitre III – Cadre d'une nouvelle méthodologie pour la génération d'un plan d'inspection ..... *- 91 -*

1. Démarche outillée de « Computer Aided Inspection Planning » ..... *- 92 -*

2. Activités du cadre méthodologique ..... *- 95 -*
2.1. Activité stratégique ..... - 96 -
2.2. Activités opérationnelles ..... - 97 -
2.2.1. Identifier les caractéristiques-clefs à suivre/contrôler ..... - 98 -
2.2.2. Identifier le mode/le moyen d'inspection approprié à chacune des KCs ..... - 102 -

2.2.3. Identifier la fréquence adaptée d'inspection et/ou les points d'insertion des tâches d'inspection - 104 -

3. Synthèse de l'état de l'art - 105 -

Chapitre IV – Outils et modèles d'évaluation des critères de la planification d'inspection - 117 -

1. Identification des caractéristiques clés - 118 -
1.1. L'analyse critique des outils existants - 118 -
1.2. Les points d'amélioration des outils retenus dans la littérature pour l'identification des KCs- 122 -
1.2.1. AMDEC - 122 -
1.2.2. KC Flowdown - 129 -
1.3. L'outil proposé, Analyse de la Causalité, des Défaillances, et leurs Effets (ACDE) - 131 -
1.3.1. Illustration de la structure proposée - 131 -
1.3.1.1. Détails de la grille - 131 -
1.3.1.2. Détails des relations entre grilles - 137 -
1.4. Processus de déploiement de l'outil - 145 -
1.5. Evaluation des facteurs de risques - 153 -
1.6. Grilles de notation et de propagation - 159 -
1.6.1. Grilles d'évaluation des causalités - 159 -
1.6.2. Grille d'évaluation de la gravité - 160 -
1.6.3. Grille d'évaluation de la difficulté de réalisation - 162 -
1.6.4. Heuristiques de la propagation - 162 -
1.7. Synthèse des apports d'ACDE - 163 -
1.8. Procédure d'identification des KCs par l'exploitation des données structurées par l'outil - 167 -

2. Apport (débouché) de la phase d'identification des KCs en évaluation de performance et prise de décision - 180 -
2.1. Identification de moyens d'inspection - 181 -
2.1.1. La prise en compte des critères de performance des moyens de production et d'inspection - 181 -
2.1.2. Activity Based Costing, pondéré qualité - 182 -
2.2. Perspectives de recherche pour l'identification de la fréquence d'inspection/les points d'insertion des activités d'inspection - 189 -

Conclusion - 191 -
Bilan des travaux - 191 -
Perspectives - 193 -

Références bibliographiques - 197 -

Annexes - 209 -

Annexe I - Dessins de définition de la pièce CAI - 211 -
I.1. Plan fonctionnel - 211 -
I.2. Plan fabrication - 212 -

Annexe II – Eléments de l'analyse fonctionnelle de la pompe à engrenages - 213 -
II.1. Fonctions principales - 213 -
II.2. Fonctions contraintes - 213 -

Annexe III - Définition de la pièce CPHC (CPHF), Corps de pompe - 214 -
III.1. Plan fonctionnel - 214 -
III.2. Plan fabrication - 215 -
III.3. Contrat de phase - 216 -

Annexe IV – Application d'ACDE sur le cas de la pompe - 219 -

Table des figures

Figure 1. Vue d'ensemble de la démarche menée pour le développement de solution - 22 -
Figure 2. La pièce C.A.I. et son environnement, le moteur F8Q - 23 -
Figure 3. Vue d'ensemble de la pompe hydraulique - 23 -
Figure 4. Illustration de la dispersion et de la dérive - 27 -
Figure 5. Taxonomie des caractéristiques [Dantan 2006] - 28 -
Figure 6. L'interdépendance des concepts - 30 -
Figure 7. Le cycle en V, développement d'un système (Faisandier 2011) (Fiorèse & Meinadier 2012) - 31 -
Figure 8. Efficacité, efficience, et pertinence - 34 -
Figure 9. Diagramme d'activité de développement du produit, de son processus, et du processus d'inspection - 37 -
Figure 10. Diagramme d'activité d'allocation de tolérances - 38 -
Figure 11. Diagramme d'activité de la conception de processus de fabrication et allocation de ces ressources - 39 -
Figure 12. Diagramme d'activité de la génération de plans d'inspection et allocation de ces ressources - 39 -
Figure 13. Contexte général du processus de la conception (vue traditionnelle) - 40 -
Figure 14. Trois niveaux d'intégration de la planification d'inspection dans le cycle de développement - 42 -
Figure 15. TQM, les grands axes d'un système de management (Hellsten & Klefsjö 2000) - 53 -
Figure 16. Positionnement des outils, méthodes, et approches de l'évaluation de la performance - 54 -
Figure 17. La classification des outils et méthodes de la littérature selon leurs approches - 54 -
Figure 18. Vue d'ensemble du moteur F8Q et ligne d'arbre C.A.I. (Positionnée sur la pompe) - 56 -
Figure 19. Les entités de la pièce à usiner - 56 -
Figure 20. La matrice de QFD ou la maison de la qualité (Tollenaere 1998) - 62 -
Figure 21. Cinq phases de QFD en cascade - 62 -
Figure 22. QFD III appliqué sur l'exemple C.A.I. - 63 -
Figure 23. QFD IV appliqué sur l'exemple C.A.I. - 64 -
Figure 24. Etape liant les spécifications fonctionnelles et de fabrications proposées - 64 -
Figure 25. Première partie de Matrice d'impact permettant de déterminer les gravités associées à chaque caractéristique - 65 -
Figure 26. Deuxième et troisième parties de Matrice d'impact permettant de déterminer l'occurrence de défaillance associée à chaque caractéristique, la difficulté de réalisation de caractéristique, et la positions des contrôles - 67 -
Figure 27. Paramètres de la variabilité - 69 -
Figure 28. Dispersions instantanée et globale - 69 -
Figure 29. Fonction perte de Taguchi (Taguchi 1993) - 71 -
Figure 30. Tolérancement traditionnel Vs. Tolérancement inertiel [Pillet 2005] - 71 -
Figure 31. Gain de connaissance due a l'enrichissement d'expérience et de compréhension (Kunzmann et al. 2005) - 74 -
Figure 32. Positionnement de la classification du coût par rapport aux étapes de la conception - 75 -
Figure 33. Application des méthodes d'estimation de coût dans la conception - 75 -
Figure 34. La comparaison de deux approches d'estimation de coût - 77 -
Figure 35. La principe de la méthode ABC - 78 -
Figure 36. KC Flowdown - 81 -
Figure 37. Un extrait simplifié d'un arbre des causes de la pièce C.A.I. - 82 -
Figure 38. Positionnement des apports des chapitres 1 et 2, au développement de la solution - 88 -
Figure 39. Décomposition fonctionnelle de la planification de processus de fabrication (Feng & Zhang 1999) - 92 -
Figure 40. Vue globale de la prise de décision sous le formalisme IDEF0 - 94 -
Figure 41. Les sous-activités de la prise de décision sous le formalisme IDEF0 - 95 -
Figure 42. Extrait de la gamme détaillée de la pièce C.A.I. - 101 -
Figure 43. La déclinaison de la qualité aux différents niveaux structurels en entreprise - 105 -
Figure 44. Récapitulatif de l'analyse des outils au regard du processus décisionnel - 106 -
Figure 45. L'évolution de la proposition - 115 -
Figure 46. Graphe typique des relations directes et la matrice correspondante, M - 127 -
Figure 47. Traçabilité des Variations/Propagations de risque selon (Whitney 2004) - 130 -
Figure 48. ACDE, la démarche de l'analyse des causalités au niveau du produit / l'estimation de la gravité- 146 -

Figure 49. ACDE, l'interopérabilité des tableaux d'analyse du produit et des composants / la propagation de la gravité - 147 -
Figure 50. ACDE, l'interopérabilité des tableaux d'analyse du produit, des composants, et du processus / l'estimation de la difficulté de réalisation - 148 -
Figure 51. ACDE, l'interopérabilité des tableaux d'analyse du produit, de ses composants, et du processus / la propagation de la difficulté de réalisation - 149 -
Figure 52. ACDE, l'interopérabilité des tableaux d'analyse du produit, de ses composants, et du processus- 150 -
Figure 53. Diagramme d'activité d'interopérabilité des trois niveaux d'ACDE - 151 -
Figure 54. Logigramme d'exploitation de données extraites des tableaux d'ACDE - 168 -
Figure 55. L'ensemble des caractéristiques et leurs liens de causalités, l'entrée de la prise de décision - 169 -
Figure 56. L'état initial de la prise de décision - 170 -
Figure 57. Procédure d'identification des KCs (Scénario 1 - I) - 174 -
Figure 58. Procédure d'identification des KCs (Scénario 1 - II) - 174 -
Figure 59. Procédure d'identification des KCs (Scénario 1 - III) - 175 -
Figure 60. Procédure d'identification des KCs (Scénario 1 - IV) - 176 -
Figure 61. Procédure d'identification des KCs (premier scénario complet) - 177 -
Figure 62. Procédure d'identification des KCs (Scénario 2 - I) - 178 -
Figure 63. Procédure d'identification des KCs (Scénario 2 - II) - 179 -
Figure 64. Procédure d'identification des KCs (Scénario 2 - III) - 179 -
Figure 65. Procédure d'identification des KCs (deuxième scénario complet) - 180 -
Figure 66. Une décomposition des critères globaux - 182 -
Figure 67. Vue isométrique de la pièce C.A.I. - 186 -
Figure 68. Vue d'ensemble de la pompe - 187 -
Figure 69. Définition des entités à usiner sur le corps de pompe - 187 -
Figure 70. Propagation des facteurs de risque incertains - 195 -

Table des tableaux

Tableau 1. Extrait d'un TAFT ..... - 57 -
Tableau 2. Extrait d'un AMDEC Produit ..... - 59 -
Tableau 3. Extrait d'un AMDEC Processus ..... - 60 -
Tableau 4. Pondération relative affectée à chaque mode de défaillance processus ..... - 66 -
Tableau 5. Définition du meilleur mode de détection en fonction du mode de défaillance du processus (Ozouf 2009) ..... - 67 -
Tableau 6. Récapitulatif des indicateurs de capabilité ..... - 72 -
Tableau 7. Les indicateurs de capabilité relative aux caractéristiques ..... - 73 -
Tableau 8. Outils et méthodes de la maîtrise de qualité, approche métier du contrôle de conformité ..... - 84 -
Tableau 9. Outils et méthodes de la maîtrise de qualité, approche métier du suivi de fabrication ..... - 85 -
Tableau 10. Outils et méthodes d'évaluation de performance ..... - 86 -
Tableau 11. Outils et méthodes de gestion de risque ..... - 87 -
Tableau 12. L'analyse de compatibilité des outils aux principes de la démarche proposée, A01 ..... - 109 -
Tableau 13. L'analyse de compatibilité des outils aux principes de la démarche proposée, A02 ..... - 111 -
Tableau 14. L'analyse de compatibilité des outils aux principes de la démarche proposée, A03 ..... - 112 -
Tableau 15. Analyse des outils au regard des critères ..... - 119 -
Tableau 16. Capacité d'identification des caractéristiques aux multiples niveaux par les outils ..... - 120 -
Tableau 17. ADCE, tableau d'analyse du produit ..... - 131 -
Tableau 18. ADCE, tableau d'analyse des composants ..... - 134 -
Tableau 19. ADCE, tableau d'analyse du processus ..... - 135 -
Tableau 20. ADCE, Causalité (A) entre les fonctions du produit et les FTEs de ses composants ..... - 137 -
Tableau 21. Causalité (B, D) entre les fonctions du produit et les FTEs de ses composants ..... - 138 -
Tableau 22. Causalité (C) entre les fonctions du produit et les FTEs de ses composants ..... - 139 -
Tableau 23. Propagation (E-F, G-H) de la gravité et de la difficulté de réalisation ..... - 140 -
Tableau 24. La structure globale d'ACDE ..... - 143 -
Tableau 25. Un exemple de l'application d'ACDE ..... - 157 -
Tableau 26. La traduction linguistique de l'impact de FTE/opération sur la fonction du produit/FTE ..... - 159 -
Tableau 27. Application d'ACDE, l'évaluation de la causalité en colonne IV ..... - 159 -
Tableau 28. Estimation de la contribution de Spécification-Paramètre "Comment quantitatif" sur Fonction-Opération "Comment" ..... - 160 -
Tableau 29. Application d'ACDE, l'évaluation de la causalité en colonne V ..... - 160 -
Tableau 30. Grille d'évaluation de la gravité ..... - 161 -
Tableau 31. Application d'ACDE, l'évaluation de la causalité en colonne VI ..... - 161 -
Tableau 32. Grille proposée d'estimation de la difficulté de réalisation au regard de la capabilité ..... - 162 -
Tableau 33. Application d'ACDE, l'évaluation de la causalité en colonne VII ..... - 162 -
Tableau 34. Propagation de la gravité de la fonction, au regard des impacts associés (dégradation de la note par des heuristiques) ..... - 163 -
Tableau 35. Propagation de la difficulté de réalisation (dégradation de la note de par des heuristiques) ..... - 163 -
Tableau 36. La matrice de criticité et l'activité d'inspection exigée ..... - 168 -
Tableau 37. Les règles actives (ou inactives) pour chaque stratégie adoptée ..... - 173 -
Tableau 38. Données d'entrée d'estimation de coût final sur la pièce C.A.I. ..... - 186 -
Tableau 39. Données d'entrée des inducteurs d'activité sur la pièce C.A.I. ..... - 186 -
Tableau 40. Extrait des données d'entrée des opérations d'usinage du corps de pompe ..... - 188 -
Tableau 41. Description des scénarios ..... - 189 -

« Qui contrôle le passé contrôle l'avenir »
Aldous Huxley

Introduction

Le contexte économique et compétitif actuel qui touche les entreprises, ne laisse pas indifférent les concepteurs du produit et processus. Les années 50 ont été marquées (Matousek 1957) (Everhart 1960) par la prise de conscience de ceux-ci de l'impact des décisions prises en amont du cycle de développement d'un système, sur des activités en aval du processus de développement. Cela a donné naissance aux techniques de l'intégration du retour d'expérience dans le cycle de développement du **produit** et de son **processus de fabrication** dans l'objectif de l'amélioration continue. La prochaine étape était de passer d'une **conception séquentielle** à une **conception intégrée** qui malgré les difficultés de mise en œuvre que cela représentait, contribuait à la satisfaction des objectifs stratégiques communs auxquels le système devrait répondre : **qualité, coût**, **délai**. D'autant plus que les avancées technologiques permettaient d'envisager ce passage.

De nombreuses recherches ont été effectuées afin de répondre à cette tendance à l'ingénierie intégrée. Elles ont été souvent consacrées à la co-conception du produit et du processus de fabrication. Nous considérons que ce qui permet cette intégration, est avant tout le fait que ces deux étapes de la conception partagent les mêmes **objectifs** (et contraintes) fondamentaux : réduction des coûts, diminution des risques, amélioration de la qualité, de la productivité, et de la satisfaction du client …. La deuxième raison est l'interdépendance des **caractéristiques** (l'ensemble des tolérances géométriques, des spécifications des composants, et des exigences fonctionnelles ou non-fonctionnelles du produit, ainsi que les paramètres opératoires du processus de fabrication) et de leurs **variations**. Les travaux récents menés notamment au sein du laboratoire de Conception Fabrication et Commande, dans ce contexte, ont mis en avant de multiples niveaux d'intégration des étapes de la conception.

Les travaux de (Bassetto 2005) s'inscrivent dans une logique d'amélioration de la qualité des produits par des actions pertinentes du contrôle des procédés sur leurs moyens de fabrication, c'est-à-dire en phase de production. Elle s'appuie sur la gestion des risques opérationnels et de mise sous surveillance des moyens de fabrication. Ces risques identifiés deviennent des connaissances métiers et permettent par la suite de mettre en place des cycles d'apprentissage pour une amélioration continue. (Shahzad 2012) se situe également en phase de production pour l'identification et l'élimination des causes liées à l'inefficacité de « Design For Manufacturing » (DFM). Ses travaux se concentrent sur la proposition d'une solution générique pour le recueil des données sur la variation en production, et leur transformation en règle et/ou modèle pour une utilisation ultérieure lors de la conception en amont (la philosophie de DFM). L'efficacité des méthodes de DFM dépend fortement de la qualité des données d'entrée. En fiabilisant celles-ci il envisage de mettre le DFM sur la bonne voie pour réduire les délais et les coûts associés aux produits défectueux. (Mili et al. 2009) se positionne aussi en phase de production pour la proposition de moyens d'analyse de données fiables, pour la gestion des risques des équipements de production et en l'occurrence pour l'élaboration des actions correctives de type maintenance. Ces actions sont liées dans l'industrie au domaine de la qualité et du contrôle des procédés et contribuent à la maîtrise de la variabilité pour éviter les non conformités. Ces travaux cités ont été réalisés dans un contexte industriel sur la production des composants semi-conducteurs.

Pour répondre aux besoins des étapes plus en amont du cycle classique de développement du produit, les travaux de (Hassan 2010) se positionnent à la fois en conception préliminaire et détaillée du processus de fabrication. Il s'intéresse particulièrement aux risques de non-qualité et le coût engendré par celui-ci. Il démontre la nécessité de l'utilisation et propose la définition des indicateurs conjoints de qualité/coût lors de la conception du processus de fabrication. Se basant sur ces indicateurs il met en place une méthodologie pour l'élaboration des actions correctives au cours de la production. Située aux mêmes étapes, (Baqai 2010) propose une démarche pour la génération de gamme de fabrication reconfigurable dans le cadre de « Manufacturing system design decomposition (MSDD) », où il considère que l'indicateur de performance permet de faire le lien entre les décisions stratégiques de la conception et les solutions opérationnelles. Il évalue également les solutions générées. Les critères d'évaluation sélectionnés sont le coût, le temps, l'étendue de familles de produit s et la qualité.

Un autre niveau d'intégration mené par des travaux de recherche est celui de la conception simultanée du produit et la gamme préliminaire du processus de fabrication, proposé par (Etienne 2007). Ses travaux se résument à la question suivante : « Comment, de façon optimale, quantifier les bornes des domaines de validité des variations des caractéristiques clés du produit afin de satisfaire les exigences de l'utilisateur tout en sélectionnant les processus de fabrication et ses ressources associées dont les variations sont inhérentes ? ».

L'enjeu est en tout cas de réduire les délais de conception et d'industrialisation du produit, à la fois par le décloisonnement des activités (Varret 2012), et une meilleure formalisation et réutilisation des connaissances métiers. Dans ce cadre, les approches de conception pour X (DFX ou Design For X) ont vu le jour dans les années 60, où les règles de conception des pièces en vue de leur fabrication ont été mises à disposition du concepteur (DFM). Il a été ensuite étendu à l'ensemble des phases du cycle de vie du produit. X désigne l'une des étapes du cycle de vie (MA : Manufacturing and Assembly, U : Usability, R : Reliability, S : Safety, Q : Quality…). Ces approches intègrent dès les phases amont de conception, les contraintes et objectifs de toutes les parties prenantes (internes ou externes) dans l'ensemble du cycle de vie du produit, depuis l'analyse du besoin, jusqu'aux phases de recyclage/destruction, pour une conception plus performante (Noël & Roucoules 2008) (Roucoules 2007) L'objectif est d'avoir une conception « bonne du premier coup » afin d'éviter les allers-retours entre la définition du produit et la définition du processus de fabrication (El Gueder 2012).

D'une manière générale certains points ont été particulièrement mis en lumière par ces travaux. Le premier est la nécessité de la maîtrise des variations du processus de fabrication. Le deuxième est le fait que le contrôle des procédés se fait certes dans le but de garantir la qualité, mais il faut garder à l'esprit que la performance ne se résume pas qu'à la qualité. Elle est multi-facettes. Nous pouvons parler ensuite de l'importance de l'utilisation des données recueillies sur des risques, identifiés au cours des contrôles des procédés, en processus de conception pour une amélioration continue. Ce qui permet la capitalisation de ces données, ce sont les outils et méthodes de gestion de risque et de qualité.

Bien que l'amélioration de la conception du produit, de son processus de fabrication, et la maîtrise de leurs variations soient souvent au cœur de ces travaux de recherche, il est impératif de poursuivre l'effet de ces variations redoutées au cours de la production et sur le produit et sur ces exigences. Pour cela le meilleur moyen reste l'inspection par le biais des mesures. Elle comprend la vérification de la conformité du produit et de ses composants au regard du cahier des charges, le **contrôle de conformité**, et la vérification de ce qui peut engendrer ces variations, c'est-à-dire le processus de fabrication, le **suivi de fabrication**. Nous démontrons par ce travail la nécessité de mise en relation de ces deux derniers pour un plan d'inspection optimal vus les objectifs fondamentaux de tous les systèmes abordés précédemment. Cette co-conception partage donc les mêmes motivations que toute démarche de la conception intégrée du produit et du processus de fabrication : la causalité des caractéristiques.

L'intégration de la conception du produit, du processus de fabrication, et du processus d'inspection, qui se positionne traditionnellement avant la phase de production, est donc envisageable. Cependant nous considérons que la co-conception de produit-processus-inspection passe avant tout par une identification des besoins d'intégration. Vu les attentes de chaque étape de la conception, une façon d'y parvenir est peut-être l'identification des besoins au fur et à mesure qu'on avance (ou plutôt qu'on recule) de l'industrialisation vers la conception du processus de fabrication et enfin celle du produit. Le travail présent se positionne désormais au premier niveau où la conception du produit et celle du processus de fabrication sont considérées comme des données d'entrée, et le plan d'inspection est attendu.

Nous pouvons formaliser la problématique de recherche comme la suivante :

*« Comment planifier le processus d'inspection, en tenant en compte à la fois les activités de **contrôle de conformité** et de **suivi de fabrication**, de façon **optimale** à l'égard des **objectifs stratégiques** par des **indicateurs de performance** ? »*

Pour répondre à cette problématique, ce mémoire de thèse est structuré de la façon suivante :

- Le **chapitre 1** présente le contexte global dans lequel s'inscrit ce travail, en extrait des objectifs stratégiques et opérationnels, et propose une brève revue des étapes clés du cycle de développement d'un produit. A partir de cela il identifie trois niveaux d'intégration pour la planification d'inspection et ainsi positionne ces travaux de thèse.
- Le **chapitre 2** présente avant tout, les exigences et critères d'analyse de l'état de l'art. Ensuite il propose une catégorisation des approches, méthodes, et outils de la littérature selon leurs apports (rôles) en planification d'inspection, avant de s'intéresser en détail à l'expérimentation et à la synthèse de ceux-ci à l'égard des exigences et critères établis. Ainsi il aborde trois grandes questions qui jalonnent le processus décisionnel de la planification d'inspection, dont les outils sont des supports.
- Le **chapitre 3** met en lumière la nécessité d'une formalisation de la démarche outillée de la prise de décision pour une planification optimale d'inspection. Il

propose ensuite la formalisation de ce processus décisionnel et définit les activités stratégiques et opérationnelles. Les attentes et les flux d'informations indispensables à chaque activité sont également détaillés. Puisque les outils, revus dans le chapitre 2, peuvent potentiellement intégrer les activités du processus décisionnel défini, une confrontation entre ces deux est proposée en synthèse. Elle a pour but de démontrer les manques des outils (par la non-considération de certaines informations jugées nécessaires à la prise de décision), et de mettre en avant les limites du processus décisionnel proposé.

- Le **chapitre 4** présente avant tout des conclusions tirées de l'ensemble des chapitres 2 et 3, c'est-à-dire l'analyse critique des outils existants. Ce chapitre est en grande partie consacré à la première activité opérationnelle du processus décisionnel. Les outils retenus de la littérature qui pourraient intervenir en première activité sont détaillés et ensuite croisés pour donner naissance à un nouvel outil adapté. Cet outil, son déploiement, et son application sont ensuite présentés. En ce qui concerne la deuxième activité du processus décisionnel, un modèle générique d'évaluation des critères est également proposé. Cependant la troisième et la dernière activité sont abordées en perspective de ce travail.

Le cheminement suivi par ces travaux est résumé en Figure 1. La boucle présente une vision transversale des chapitres 2 et 3.

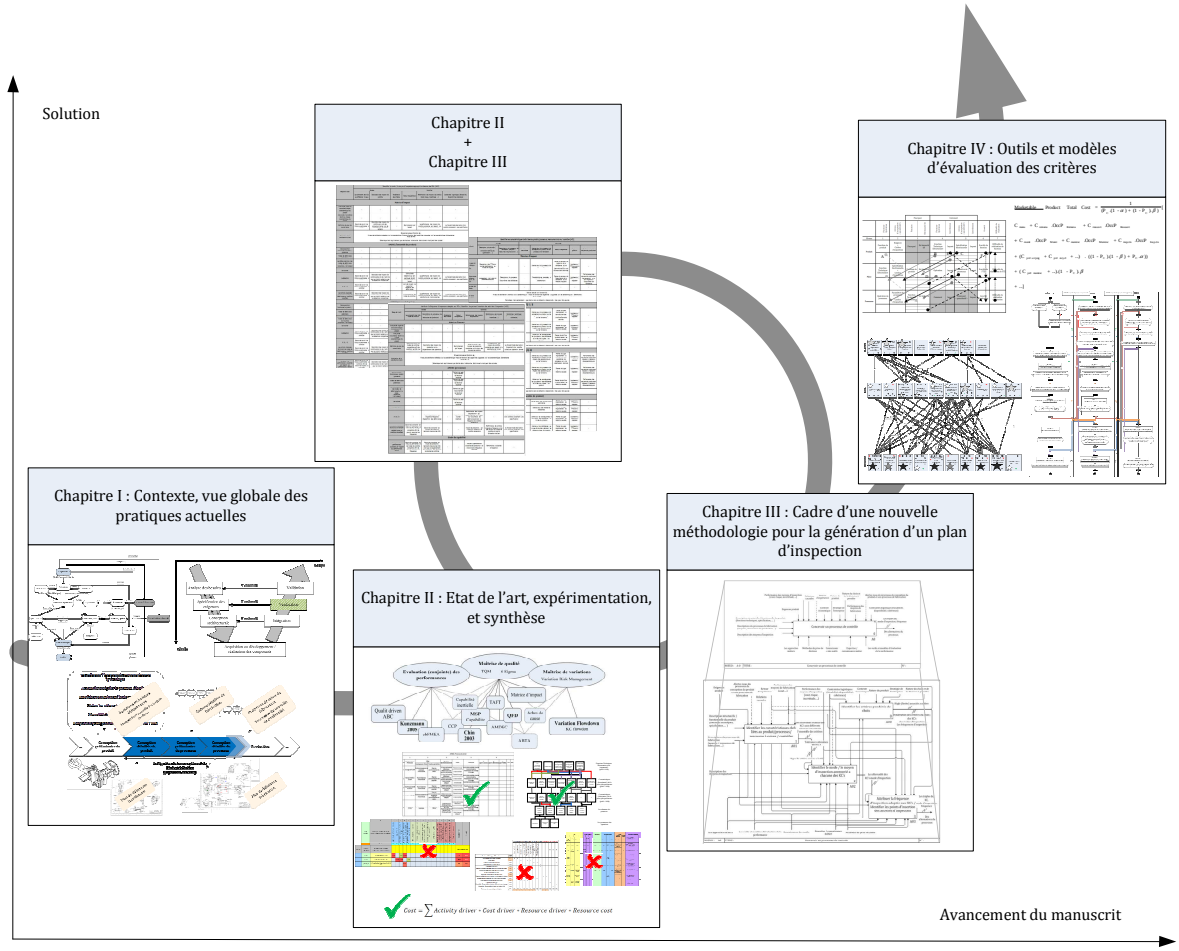


Figure 1. Vue d'ensemble de la démarche menée pour le développement de solution

Un exemple concret et commun d'application de l'ensemble des outils en chapitre 2 est proposé afin d'avoir une comparaison, une synthèse, et enfin une proposition de choix plus fiable des outils. Il fait également l'objet d'une estimation de coût en chapitre 4. À savoir que les estimations quantitatives dans cette étude devraient être considérées à titre indicatif. Cet exemple est une pièce industrielle : le couvercle d'arbre intermédiaire (C.A.I.). Elle est située sur le moteur type F8Q de certains véhicules des constructeurs Renault et Volvo (Certa 2014) (Figure 2).

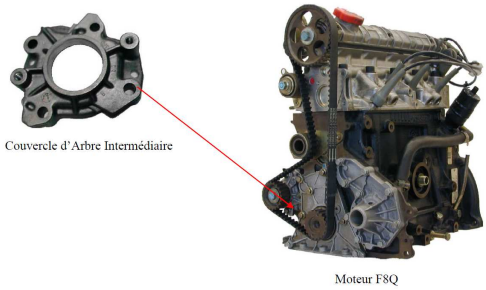


Figure 2. La pièce C.A.I. et son environnement, le moteur F8Q

Pour montrer la cohérence et l'applicabilité des démarches mises en place, nous avons fait le choix de déployer une autre étude de cas plus complète (ayant de multiples pièces, composantes du produit). Il s'agit d'une pompe hydraulique illustrée en Figure 3 qui nous permet de mieux comprendre la définition des concepts en chapitre 1, et de mettre en application le processus décisionnel proposé en chapitre 4.

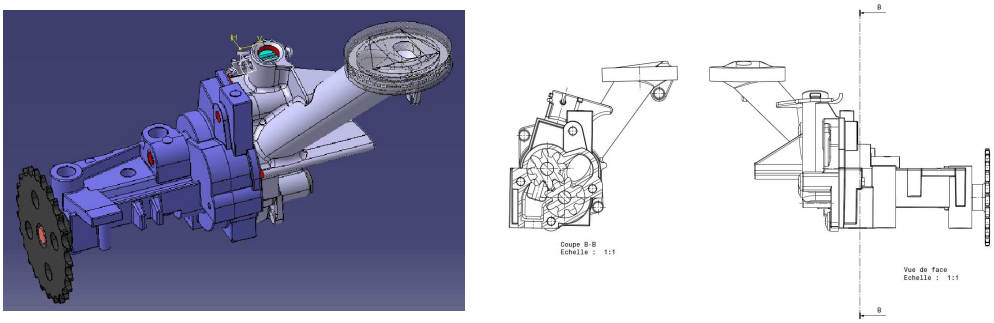


Figure 3. Vue d'ensemble de la pompe hydraulique

La raison du choix des cas d'étude est principalement la disponibilité des données industrielles. La définition géométrique de ces produits ainsi que leurs gammes de fabrication sont connues. Ils font l'objet de la génération d'un plan d'inspection conformément au positionnement du travail de recherche présenté dans ce mémoire de thèse. Dans ce travail de recherche nous avons limité l'étude à des spécifications géométriques, mais la démarche est évidement valable pour d'autres contextes.

Chapitre I - Contexte, vue globale des pratiques industrielles actuelles

L'objectif de ce chapitre consiste à introduire le contexte global dans lequel s'inscrit le travail. Avant tout, une présentation des concepts principaux relatifs à ce travail de recherche est proposée. Nous y voyons la nécessité d'établir un plan d'inspection afin de garantir la qualité du produit ou du service vue à l'extérieur de l'entreprise, et de maîtriser les variations en interne. Les objectifs opérationnels et l'intérêt stratégique des activités d'inspection sur le plan économique et technique sont ensuite argumentés. Une section est par la suite consacrée à une brève analyse du processus de développement du produit et de son processus de fabrication ainsi que des pratiques actuelles dans le cadre de planification d'inspection. Nous montrons que ces dernières se situent en général d'une manière chaotique tout au long du processus de développement du produit. En l'occurrence, nous proposons un positionnement de ce travail de recherche par rapport aux étapes habituelles de développement du produit. A travers cette analyse du contexte deux facettes majeures de la qualité sont déduites et mises en avant : celle du produit et celle de son processus de fabrication. Leur prise en compte est au cœur de la problématique abordée dans ce travail dont l'objectif est de fournir la proposition d'un plan d'inspection optimal.

1. Introduction

Nous souhaitons aborder dans ce chapitre des notions qui prédominent dans le contexte de la planification d'inspection. Leur diversité nous amène à figer certaines définitions inspirées de la littérature relative à notre domaine d'étude. Cela ouvre la voie à l'appréhension et la définition des objectifs opérationnels et stratégiques de l'inspection au fur et à mesure. Une revue de la littérature démontre que la plupart des travaux de recherche, autour de la planification d'inspection, se sont focalisés sur un ou plusieurs de ces objectifs stratégiques. Dans le cadre de la planification d'inspection, de multiples voies de recherche et d'amélioration sont donc exploitées. Pour une meilleure définition de la problématique, le positionnement de l'activité de planification d'inspection dans le processus de développement du produit est ensuite analysé. Il met en avant la problématique de recherche autour de laquelle ce mémoire s'articule.

1.1. Les concepts

Le caractère imprévisible attaché aux résultats de toutes actions ou d'une évolution de toute nature, l'**incertitude**, préoccupe particulièrement le monde manufacturier. Dans un système de production, cela s'affirme davantage face aux produits de plus en plus complexes dans leur conception, fonctionnements, processus de fabrication, … Face aux incertitudes inévitables, les entreprises doivent apprivoiser les effets de ces dernières dans l'ensemble du système, où elles se déclinent et se répandent.

L'incertitude se traduit par deux dimensions, la **précision** et l'**exactitude**. La première, aussi appelée déviation standard, indique comment les valeurs sont distribuées autour de la valeur voulue, et la deuxième détermine si la moyenne des valeurs obtenues est identique à celle voulue. À l'égard du processus de fabrication, à l'origine du produit, un premier axiome (les suivants viendront selon l'introduction des concepts) s'inspire de (Srinivasan 1999) (Mathieu 2007) et (Dantan 2009) : « Personne n'est capable de réaliser une forme géométrique exactement conforme à sa définition fonctionnelle (exactitude) de plus, personne n'est capable de reproduire exactement une forme réalisée (précision) ». A noter que ce n'est pas uniquement les propriétés géométriques qui sont exposées à l'imprécision et à l'inexactitude. Ces propriétés peuvent être fonctionnelles, dimensionnelles, opératoires, ou même non-fonctionnelles comme la sécurité … L'absence non souhaitée mais inévitable de la précision et l'exactitude des **paramètres opératoires** d'un processus de fabrication, appelée d'une manière générale l'**imprécision de fabrication**, peut engendrer notamment le non-respect des attentes au regard de la conception du produit et de ces composants. L'effet déterminant de cette imprécision représente la **variation en fabrication**, un des sujets préoccupant les entreprises.

Dans un système lorsqu'un paramètre varie, il est dit qu'il y a un écart entre la situation idéale et la situation réelle. Cela dit, il n'existe pas deux choses identiques. La variation se présente dans tout système ou processus et en conséquence sur tout type de produits ou de services. Elle peut être grande ou petite, prévisible ou imprévisible, réversible ou irréversible. Elle se caractérise par l'instabilité de la dispersion autour de la valeur voulue, la variation, ou par le décentrage du processus par rapport aux limites définies lors de la conception, où les concepteurs disposent d'une parfaite connaissance des valeurs de toutes les variables et périmètres de processus. Puisqu'on ne peut pas empêcher la

survenue des variations et que les variations aléatoires sont par définitions imprévisibles, nous pouvons dire au moins que lorsqu'elles sont prévisibles ou naturelles, les variations sont dites maîtrisées. L'uniformité du processus, du produit et ses composants, … est alors supposée atteinte.

Dans le présent travail, l'amélioration d'un système consiste, dans un premier temps, à réduire l'imprécision de fabrication, en ce qui concerne la dispersion de la fabrication et la **dérive** du processus. La **dispersion** représente les variations des valeurs autour d'une moyenne attendue et la dérive représente l'écart entre la valeur voulue (cible) et la moyenne (Figure 4). Ensuite il est nécessaire d'analyser les **effets des variations** du processus sur les propriétés géométriques, fonctionnelles, ou non-fonctionnelles des pièces composants du produit et la fonctionnalité attendue de celui-ci. À savoir que le comportement d'un système dans son ensemble est la suite logique de la prise en considération, ou pas, de ces effets.

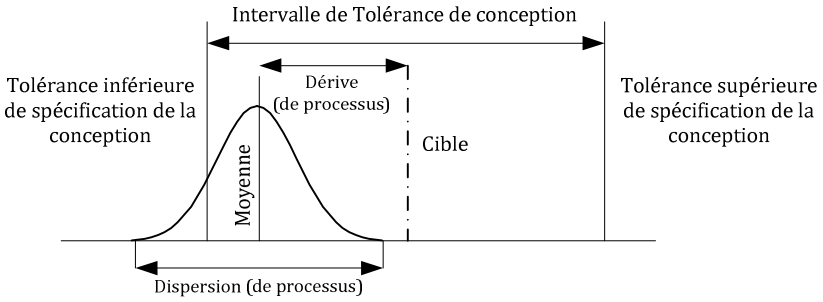


Figure 4. Illustration de la dispersion et de la dérive

Chaque produit ou service est destiné à répondre à un certain nombre de besoins, documentés ou non, exprimés ou non, attendus par l'utilisateur externe ou interne de l'entreprise. Un **besoin** est une nécessité, un désir ou une attente éxprimés par une partie prenante (Fanmuy & Groupe de travail Ingénierie des exigences 2011), comme *« Accumuler et réguler la pression d'huile haute pression »* pour une pompe hydraulique. Les besoins sont formalisés en **Exigences** des parties prenantes et définissent le « Quoi » sans détailler la solution « Comment » telle que *« La fuite d'huile minimale et maximale acceptable »*. Il est clair que les exigences externes ne sont réalisées que par le biais de celles définies en interne au cours de la conception. (Fanmuy & Groupe de travail Ingénierie des exigences 2011) les distingue en **exigence système** et **exigence sous-système**. Cependant l'exigence sous-système se rapproche du domaine de la solution. Elle est issue de l'allocation des exigences système par la conception du système et des contraintes liées à la conception des composants comme *« Limiter le passage du fluide via les engrenages et le corps de pompe »* et *« Empêcher le passage du fluide entre le corps de pompe et le moteur »*.

L'exigence est donc d'une manière générale ce qu'un produit ou un service particuliers devraient être ou faire ou même satisfaire. (Etienne 2007) propose une définition de l'exigence qui couvre l'ensemble des aspects souhaités ; demande formelle, exprimée en terme qualitatif et/ou quantitatif de provenance externe (l'expression des besoins d'un client) ou interne (exigences propres à un métier). Les exigences peuvent être

fonctionnelles (géométriques, …) ou même non-fonctionnelles. Celles du produit ne sont respectées que si les pièces composants du produit respectent leur conception géométrique et structurelle, dite **spécification** telle que *« Les diamètres des cercles de tête des pignons de pompe »* ou *« Le parallélisme et la localisation des deux plans des engrenages de pompe »*. D'une manière générale la spécification est une condition sur une propriété du produit ou de la pièce. Les spécifications des composants leur permettent de satisfaire des fonctions intermédiaires des fonctionnalités et exigences finales du produit. Une spécification est un ensemble de contraintes ou conditions définies d'une manière explicite qui assurent le respect des exigences (Dantan 2009). En revanche lors de la conception, ce qui garantit la satisfaction des fonctions du produit par les spécifications des composants, c'est la synthèse des spécifications et l'allocation des **tolérances**. Elles définissent en effet des limites tolérées des variations qui contribuent à l'aboutissement des fonctions élémentaires des pièces et donc à celles du produit.

L'ensemble de ces tolérances géométriques, des spécifications quantitatives et qualitatives des composants, et des exigences fonctionnelles ou non-fonctionnelles du produit, ainsi que les paramètres opératoires du processus de fabrication, sont regroupés dans ce manuscrit sous le terme générique de « **caractéristique** » (Figure 5).

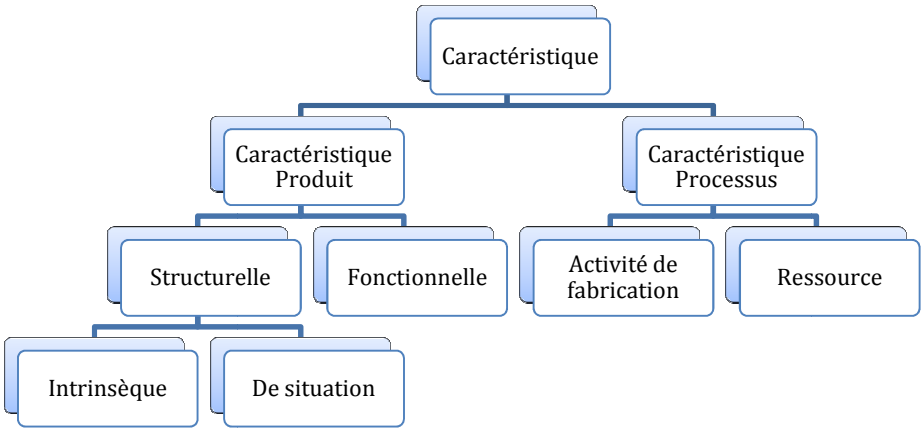


Figure 5. Taxonomie des caractéristiques [Dantan 2006]

Les exigences sont liées aux spécifications des pièces par une ou plusieurs caractéristiques géométriques (Marguet & Mathieu 2001). Les caractéristiques du produit sont conditionnées par des spécifications intrinsèques de l'ensemble des composants du produit ainsi que celles inhérentes à la montabilité du produit (pièce-pièce). Partant de l'hypothèse d'une conception bien faite et cohérente, le respect des spécifications garantit la fonctionnalité et la sécurité du produit mais en soi, peut dépendre de l'aptitude du processus et de ces ressources à respecter les tolérances établies. Après un premier axiome associé à l'incertitude en fabrication, nous pouvons parler à ce stade d'un deuxième axiome qui s'appuie sur la définition de l'incertitude de corrélation établie par (Srinivasan 2001) (Dantan 2009) : « La fonctionnalité ou l'exigence peut ne pas être parfaitement corrélée avec les caractéristiques que l'on estime influentes sur celle-ci ». Le concept de « caractéristique processus » englobe les paramètres opératoires, les paramètres de réglages, mais aussi les défaillances opératoires. Bien conscient qu'à un niveau d'études « micro » (techniques de pilotage du système de production, …), il est

important de distinguer ces notions, dans notre cas (niveau d'études macro), ces notions sont agrégées.

Dans les systèmes manufacturiers de plus en plus complexes, les variations du processus de fabrication et de ses paramètres opératoires ainsi que leurs effets sur l'ensemble du système doivent être maîtrisés. Au regard de la conception du produit, la « **vérification** » est ce qui permet de confirmer (ou non) le maintien du processus de fabrication dans un état stable et le respect des spécifications et exigences du produit. La tendance de ce jour à l'automatisation dans les industries demande une vérification plus stricte et une meilleure organisation de celle-ci.

Pour ce faire les variations doivent être quantifiées, par le biais de la « **mesure** » de l'écart entre la cible et la situation actuelle. L'origine de ces variations et la fréquence à laquelle, elles se produisent doivent être également déterminées. Cela s'inscrit dans le cadre de la vérification de l'aptitude et de l'adéquation.

Nous pouvons parler de « **métrologie** » lorsqu'une spécification d'un produit industriel fait l'objet d'une vérification. Dans ce cas la conformité des conditions et exigences des caractéristiques est vérifié par des mesures, dont la définition est la suivante : « le processus d'obtenir d'une façon expérimentale une ou plusieurs valeur attribuée à une grandeur (ISO/DIN 2012) ». Métrologie, ou « le champ des connaissances concerné par la mesure », à propos de l'amplitude d'une quantité (ISO/DIN 2012), est en soi un domaine de connaissances. Il comprend les aspects théoriques et pratiques des mesures des grandeurs physiques ou « **inspection** » au sens plus étendu de cette pratique.

La version 2008 de la certification ISO 9001 (ISO 9001 2008) indique ainsi la nécessité d'inspection et d'organisation de celle-ci, **plan d'inspection** : « L'organisme doit déterminer les activités de surveillance et de mesure à entreprendre et les dispositifs de surveillance et de mesure nécessaires pour apporter la preuve de la **conformité** du produit aux exigences déterminées ... L'organisme doit établir des processus pour assurer que les activités de surveillance et de mesure peuvent être effectuées de manière cohérente par rapport aux exigences de surveillance et de mesure ».

En résumé, ce qui nous incite à mener des activités de vérification est donc la « variation » au sens large. L'inspection comprend la vérification de l'aptitude du processus et le suivi du « résultat » de processus sur le produit ou le service, « **qualité** ». (Deming 2000) considère la variation comme: « a disease that results in waste and poor quality ». A noter que la variation émerge d'une vision (vigilante) interne à l'entreprise tandis que la qualité évoque traditionnellement une vision extérieure.

On ne peut nier que la qualité ait pris un tournant très important. Sa définition a également évolué au cours des dernières décennies. Elle n'est plus un simple argument commercial et sa définition ne se résume pas à « un jugement du client, et par non plus à une appréciation de bureau d'études, de producteur, de marketing ou de direction générale » (Feigenbaum 1986). Lorsqu'on demande aux concepteurs ou aux utilisateurs impliqués dans le cycle de vie d'un produit ou d'un service de définir la « qualité », les réponses auront une certaine forme commune décrite par (ISO 8402 1994) : « L'aptitude d'un ensemble de caractéristiques d'une entité qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des

besoins exprimés et implicites ». À nos jours cela peut prendre également des dimensions plus larges comme la perception émotionnelle du consommateur qui n'est souvent pas exprimée. Le développement d'un produit ou service est efficient lorsqu'il répond aux besoins identifiés, exprimés et validés.

Pour la suite de ce travail, la qualité sera celle décrite par (Delvosalle 2002) comme :

> « Le jugement et l'appréciation du bénéficiaire (interne ou externe à l'entreprise, le client, les acteurs et toutes les parties prenantes), basé sur son expérience au regard de ses besoins et attentes, exprimés ou non, conscients ou intuitifs, techniques ou subjectifs ».

Cette définition couvre l'ensemble des approches identifiées par [Pillet 2004]. D'un point de vue :

- Produit, la qualité est basée sur les attributs du produit
- Utilisateur, la qualité est l'aptitude à l'emploi
- Processus, la qualité est la conformité au besoin

Après l'introduction de certains concepts fondamentaux sur lesquels s'appuie ce travail, et notamment la définition multidimensionnelle de la qualité, un diagramme conceptuel est proposé qui montre leur interdépendance logique (Figure 6).

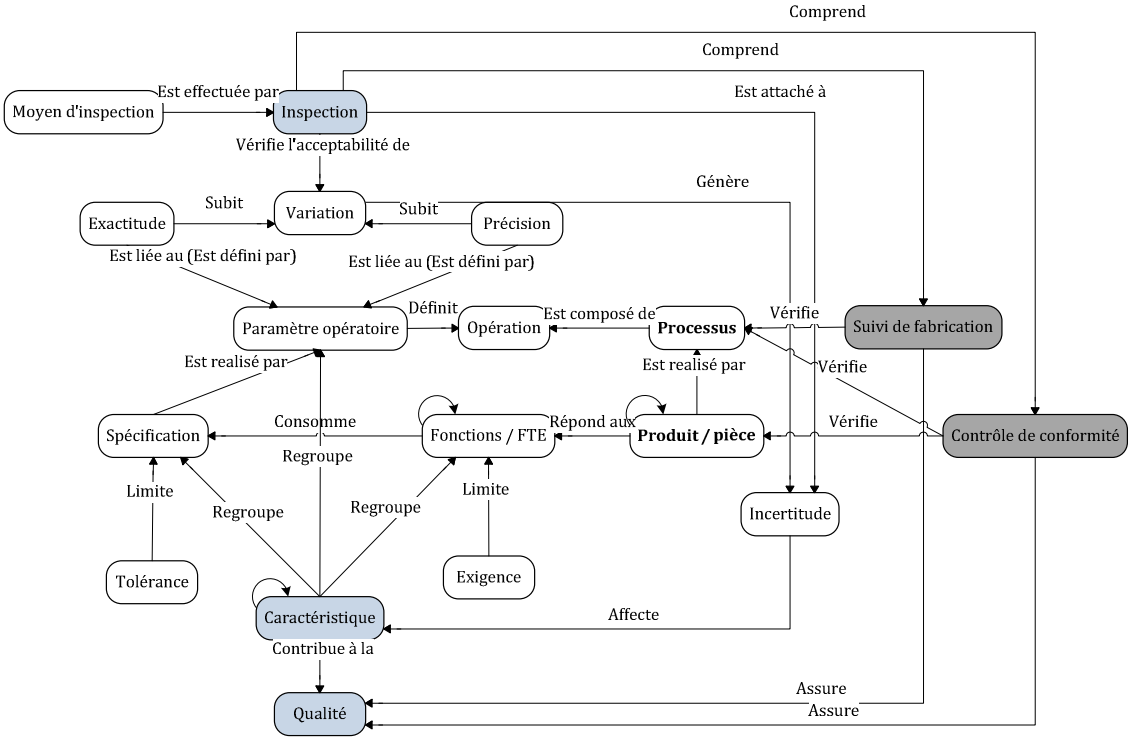


Figure 6. L'interdépendance des concepts

Ces concepts interdépendants interviennent tout au long du cycle de développement du tout système. Cela démontre l'interdépendance des décisions prises au cours de ce cycle. Cela ouvre la question de positionnement de la qualité et en l'occurrence ce travail de

recherche par rapport aux étapes habituelles de développement du système. Le processus générique de développement, le cycle en V, a beaucoup évolué au cours de ces quarante dernières années. Cependant le cycle en V représente toujours une structure théorique légitime même si restreinte en application pour des systèmes complexes (Faisandier 2011) (Fiorèse & Meinadier 2012) (Godot 2013). Il est constitué (Figure 7) :

- D'une branche descendante qui comprend les activités d'élucidation des besoins, de définition des spécifications et exigences du produit, et de conception architecturale, où l'ingénierie système s'applique,
- D'une branche montante des activités d'intégration, vérification, et validation,
- D'une l'intersection de celles-ci associée au développement physique, voir à la conception détaillée du système (Fiorèse & Meinadier 2012).

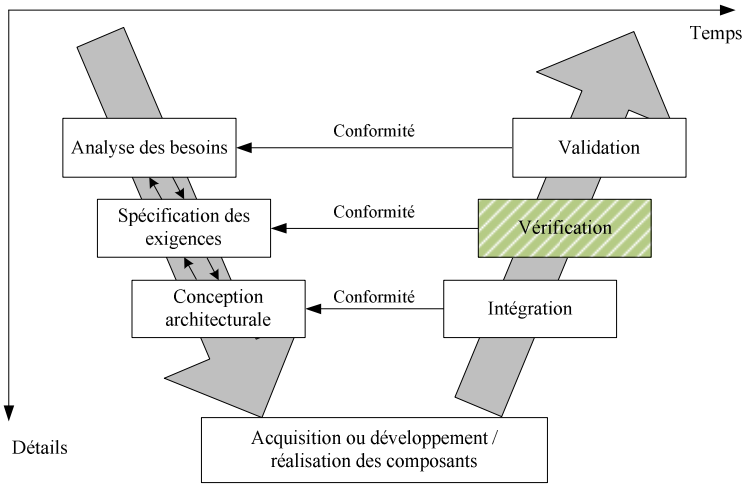


Figure 7. Le cycle en V, développement d'un système (Faisandier 2011) (Fiorèse & Meinadier 2012)

Bien que la définition de plans d'inspection puisse commencer dès les premières étapes du développement du produit, elle contribue de toute manière à la vérification des exigences conçues en première phase (Figure 7). Néanmoins trois niveaux d'intégration de la planification d'inspection dans le cycle de développement sont proposés en section 1.5. Dans ce contexte, l'inspection va bien au-delà du terme, « testing » pour découvrir les défauts et les éliminer et permet de déterminer au plus tôt la source des défauts (Faisandier 2011). La section suivante met en évidence les objectifs opérationnels de l'inspection qui rend celle-ci indispensable dans le cycle de développement.

1.2. Les objectifs opérationnels de l'inspection

L'inspection inspire à première vue deux objectifs opérationnels. Etant donnée la définition de l'inspection, des activités de mesure et d'essai d'une ou plusieurs caractéristiques du produit ou de son processus de fabrication, les fabricants perçoivent deux principales facettes de la démarche d'inspection : le **contrôle de conformité du produit** et le **suivi de processus de fabrication**.

L'inspection comprend en effet non seulement le suivi des variations du processus de fabrication mais aussi le suivi des changements importants qui en découlent au niveau des spécifications et des exigences. Ces changements empêchent la conformité des pièces et du

produit au regard du **cahier des charges** établi lors de la conception du produit. Dans un système quelconque le rôle de l'inspection est de déterminer si oui ou non un produit, un service ou un système est conforme à des exigences, spécifications ou conditions imposées (PMBOK 2000).

La **non-conformité** des caractéristiques par rapport au cahier des charges entraine l'insatisfaction du client au regard de ses besoins (Zhao et al. 2009). La maîtrise de la variabilité des caractéristiques est fortement dépendante de l'ensemble des décisions explicites et implicites prises non seulement au cours de la conception de produit et ses composants, mais aussi lors du choix des méthodes de fabrication, processus et ressources. Cela est notamment le cas lors des prises de décisions qui aboutissent à un plan d'inspection. Dans un contexte industriel l'inspection se traduit comme une action, **détective** par notamment le contrôle de conformité ou **préventive** par le suivi de fabrication, qui permet de vérifier la conformité de l'état du système (prédire la non-conformité) par rapport à un cahier des charges (aux exigences opérationnelles) et d'avoir une bonne veille sur le déroulement du processus par des mesures de métrologie d'une façon régulière ou ponctuelle (irrégulière).

Les plans de contrôle de conformité du produit commencent à émerger, suite à la conception du produit en bureau d'études, lorsque les spécifications techniques critiques pour le client sont mises en évidence et traduites pour le bureau des méthodes ou en bureau de contrôle de qualité pour les grandes entreprises. La conformité des spécifications du produit dépend d'un ensemble explicite d'exigences auxquelles doivent répondre le produit ou le service. Elle est vérifiée au regard des exigences relatives aux étapes appropriées de la fabrication de produits (ISO 9001 2008). Il est à noter que le souhait final du client ne réside pas uniquement sur une caractéristique mais aussi sur le fonctionnement du produit (Pillet 2005) (Duret & Pillet 2011), c'est-à-dire un ensemble de caractéristiques (Figure 5). Le contrôle de conformité du produit n'améliore pas en soi ce dernier et il ne se suffit pas à lui seul.

Un plan d'inspection peut comprendre également l'identification de la variation du processus de fabrication, la détermination de la stratégie et même les limites de contrôle. Elle peut être étendue au diagnostic de la variation de processus (Yang 2007).

La planification de processus de fabrication traduit les exigences de la conception en paramètres et étapes des procédés de fabrication. Ainsi, la planification de la surveillance du processus de fabrication assure le respect des exigences et les contraintes de la conception du produit. Le suivi de fabrication vise à appliquer des méthodes appropriées pour la surveillance de processus afin de mesurer et d'évaluer son aptitude à atteindre les objectifs établis par le bureau d'études (ISO 9001 2008). Le bureau des méthodes est donc apte à identifier les opérations dont la (non-)aptitude pour la réalisation d'une spécification exige un suivi systématique de processus de fabrication.

Après avoir revu les objectifs opérationnels d'inspection, la section suivante aborde un regard global sur le système et sa performance dans son ensemble puisque celle-ci n'est pas seulement axée sur la qualité. Dans le but d'accroître la performance, la légitimité des mesures d'inspection qui mène à la qualité est mise en avant par des arguments économiques et d'autres objectifs stratégiques d'inspection.

1.3. Les objectifs stratégiques de l'inspection

La conformité du produit est assurée grâce à la fonctionnalité et le comportement de tous ces composants. Leur conformité par rapport aux exigences est vérifiée (pour être acceptée ou rejetée) par le contrôle de la qualité du produit. D'autre part la non-conformité pour le client peut être due à une dérive du procédé de fabrication. C'est pourquoi la surveillance préventive est parfois nécessaire pour maîtriser un système de production. Une politique de maintenance préventive peut assurer l'efficacité des moyens de production et peut réduire également le coût d'intervention lié à la dégradation ou la défaillance des moyens de production. Réduire le nombre de ces interventions que ce soit le contrôle de conformité ou le suivi de fabrication, augmente également la productivité du système. Réduction des coûts et augmentation de la productivité ont toujours été les principaux intérêts des industriels.

D'autre part les industriels confrontent les objectifs contradictoires du coût et de la qualité. Le maintien de la qualité exige une augmentation des investissements en détection et prévention des défaillances et peut conduire à une sur-qualité. En même temps vouloir réduire les coûts, mène à la réduction de la fréquence et de nombre des activités d'inspection et à une sous qualité.

D'après (Peters 1977), le besoin de la métrologie précise et exacte a émergé dans le monde industriel initialement dans le but de réduire les activités d'assemblage et de garantir l'interchangeabilité des composants. La métrologie passive, la vérification de satisfaction des exigences après les opérations de fabrication n'a pas été souvent défendable d'un point de vue économique. L'apparition de la métrologie active a déclenché une tendance à la réalisation des mesures plus proche des opérations de fabrication tout au long du processus afin de pouvoir intervenir le plus rapidement possible dans le cas d'une dérive au niveau du processus. Cela limite des surcoûts dus au maintien des produits défectueux dans la chaine de fabrication et mène à privilégier **un équilibre entre la prévention et la détection** pour répondre à des questions vitales au sein de l'entreprise, le coût, le délai …, la performance en général. Ainsi la philosophie des mesures a évolué d'une intervention nécessaire mais non-productive à une valeur ajoutée à la chaîne de production. Les pratiques de la maîtrise de qualité dont l'inspection ont également évolué, comme évoqué par (Pillet 1993), de l'artisanal à l'industriel dans un premier temps et ensuite d'une vision purement orientée produit, à une vision orientée vers l'ensemble produit, processus, ressource.

Malgré la réputation non productive de la métrologie dans les industries, (Kunzmann et al. 2005) approuve le rôle de cette dernière comme un générateur de valeur aux yeux de chacun ; l'ingénieur de production et le métrologue industriel … La métrologie productive assure non seulement la satisfaction du client final mais également se fonde sur des arguments économiques, en fournissant de la connaissance pour **une meilleure prise de décision tout au long de la conception du produit, son processus de fabrication et le plan d'inspection**. Ce dernier comprend les activités de la maîtrise du processus (vérification intermédiaire) et celles de la vérification finale de la conformité du produit. Pour une métrologie productive, la pratique d'inspection doit être suivie par une synthèse qui transforme les informations collectées en connaissances, explicite ou tactique, et ensuite en savoir-faire.

Bien que l'inspection soit ainsi revalorisée, nous ne pouvons pas négliger le coût engendré par celle-ci et le temps d'intervention qui ne favorise pas la productivité. De même envisager une industrialisation sans « vérification » serait irréaliste. Néanmoins pour s'approcher de cet idéal, il existe des travaux de recherche dont l'idée peut se résumer comme suit :

« Le contrôle est à la qualité, ce que le stock est à la gestion des flux : un mal nécessaire que l'on doit réduire le plus possible » (Pillet et al. 2007).

« La qualité ne peut pas être contrôlée, mais il faut la produire » (Pfeifer 2002).

Ce qui est mis en question ici, est en effet l'« **efficience** » de la fabrication, de ses moyens, et de l'ensemble du système, c'est-à-dire le rapport entre les résultats obtenus et les ressources utilisées pour les atteindre (Vernadat 1999) (Dantan 2009) (Figure 8).

Nous adoptons dans ce travail les mêmes perspectives dans l'élaboration du plan d'inspection pour l'amélioration de performance. A savoir que la performance du système ne dépend pas uniquement de l'allocation d'inspection mais aussi des moyens et ressources d'inspection employés, comme le précise la norme (ISO 9001 2008), en paragraphe 4.11, par la nécessité de la maintenance et de la calibration de ceux-ci pour démontrer la conformité du produit. L' « **efficacité** », le rapport entre les résultats obtenus et les objectifs, de ces moyens d'inspection se mesure souvent par l'**incertitude de mesure** (Figure 8). Elle est résumée par l'axiome suivant :

« Tous les systèmes et instrument de mesure sont toujours soumis à une certaine incertitude » (Srinivasan 1999).

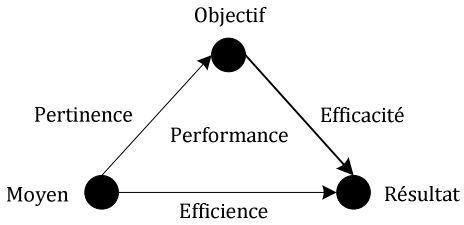


Figure 8. Efficacité, efficience, et pertinence

Pour la planification d'inspection, les entreprises sont aussi contraintes par la disponibilité des moyens de production et ceux de l'inspection ainsi que leurs critères de performances (le coût de la métrologie, l'incertitude de l'inspection ou de la pertinence des mesures liée à la précision et à l'exactitude, la capabilité de production ...) pour garantir la qualité. Ceux-ci limitent le concepteur dans ses choix lors de développements du produit et du processus, depuis les étapes préliminaires de la conception. Si on considère la qualité comme objectif, l'enjeu est de s'assurer de la « **pertinence** » des moyens alloués vis-à-vis de l'objectif (Bescos 1995) (Figure 8).

Par cette analyse, de multiples critères et objectifs ont été soulignés : la satisfaction du client ou la qualité, la productivité, le coût, l'incertitude de mesure … qui intègre la prise de décision pour la génération du plan d'inspection. Selon (Pfeifer 2002) lorsqu'on fait de l'inspection, d'une manière générale certaines questions doivent être posées ; what to test

? when to test ? how to test ? how much to test ? … Répondre à ces questions implique une attention particulière puisqu'un système est souvent associé à des contraintes et à des objectifs contradictoires à satisfaire ; le coût engendré par l'inspection, la précision et l'exactitude des mesures, la qualité maintenue, … Nous parlons donc d'une prise de décision multicritères.

Un plan d'inspection « efficace » doit répondre à ces critères. Pour rendre cela possible l'efficacité d'inspection est abordée par la littérature de multiples points de vue. Par la section suivante une revue des travaux de recherche effectués autour de l'inspection, est proposée.

1.4. Revue des champs de recherche en inspection, Coût Vs. Qualité

Les pionniers dans ce domaine ont aperçu les avantages de l'inspection et ont traité son efficacité de multiples points de vue. Ces points de vue ont évolué et émergé au fil des décennies, et se sont orientés notamment vers une approche de coût versus qualité. Diverses voies d'amélioration sont exploitées : l'erreur d'inspection, l'échantillonnage, l'optimisation des bénéfices attendus, l'allocation d'inspection pour l'optimisation de l'efficacité …

Certains se sont focalisés sur les impacts des erreurs d'inspection liés à l'incertitude sur la qualité. L'inspection, qui se caractérise par la détection de l'inexactitude et de l'imprécision. Dans un plan d'inspection complet, chaque élément entrant est soumis à une vérification de l'aptitude du produit ou du processus. Si le résultat (erroné ou pas) du contrôle indique qu'un élément ne respecte pas des limites de spécification prédéterminées, l'élément doit être mis au rebut ou ré-usiné pour faire en sorte que sa caractéristique soit recentrée autour de la valeur cible. Les limites de spécification sont déterminées par un compromis entre le coût engagé par la qualité imparfaite, le coût du ré-usinage et le coût de l'inspection… Les effets économiques et les traitements statistiques de l'erreur d'inspection sur le plan d'inspection complet sont ainsi étudiées (Tang & Schneider 1987) (Mei et al. 1975) (Menzefricke 1984).

Bien que les analyses statistiques démontrent une erreur moindre pour les inspections à 100%, cela ne pouvait pas être justifié sur le plan économique. Ainsi d'autres voies comme l'échantillonnage ont vu le jour. Les plans d'échantillonnage pour l'acceptation, conçus dans l'hypothèse d'inspection parfaite ont été ensuite mis en question. Les effets de l'erreur d'inspection ont été donc examinés sur la probabilité de l'acceptation et la qualité sortante moyenne. Ainsi des méthodes de génération de plans d'échantillonnage ont été proposées qui considéraient explicitement l'erreur d'inspection (Collins et al. 1973). Les plans d'échantillonnage pour l'« Average Outgoing Quality Limit » AOQL, ont été introduits par Dodge et Romig autour des années 30, voir (Dodge & Romig 1945). Par définition, la limite de l'AOQL, pour un plan d'échantillonnage, conduit à une inspection de l'ensemble de la population si l'échantillon présente un certain nombre d'articles défectueux K supérieur à une limite d'acceptation K_0. Il est valable non seulement pour le contrôle de la qualité mais aussi en matière d'audit. Beaucoup de travaux de recherche ont été effectués pour bien définir la constante K_0, en tenant compte des erreurs d'inspection, de telle sorte

qu'une certaine probabilité de conformité soit assurée après l'inspection et la correction éventuelle des défauts (Kleijnen et al. 1992).

La dimension économique grandissante de la qualité fournie, a ouvert la voie aux travaux d'estimation et d'optimisation du bénéfice attendu d'un processus de qualité, le contrôle de conformité ou le suivi de fabrication. Le choix d'inspection ne garantit pas uniquement le niveau de la qualité mais peut optimiser à la fois le bénéfice. Les travaux de recherche ont contribué à une meilleure formulation (plus proche de la pratique) de ce problème d'optimisation (Hunter & Kartha 1977) (Bisgaard et al. 1984). Ils ont également démontré l'impact des erreurs (le rejet dû à l'erreur d'inspection) ou la précision d'inspection (maximale lorsque l'erreur tend vers zéro) sur le bénéfice (Carlsson 1989). Lorsque le contrôle d'un processus de fabrication est nécessaire, l'outil commun est souvent la maîtrise statistique des procédés (MSP). La conception de cartes de contrôle se réfère à la spécification de la taille de l'échantillon, la fréquence d'échantillonnage et des limites de contrôle de la carte. Dans le passé, toutefois, les facteurs économiques ont été exploités après la mise en place des cartes de contrôle. (Lall et al. 1991) propose d'intégrer la dimension économique dans le modèle de calcul des limites de contrôle.

L'allocation d'inspection par la simulation fait également le sujet de multiples travaux d'amélioration de processus de qualité (Elmaghraby 1986). Les méthodes stochastiques font partie des solutions pour une allocation optimale (Viswanadham et al. 1996). A noter que l'inspection ne se limite pas à la détection des mauvais produits. Les chercheurs ont abordé le problème des pièces (composants d'un produit) multi-caractéristique (Greenshtein & Rabinowitz 1997) pour une meilleure efficacité de l'allocation d'inspection. (Lubicz 1983) propose l'évaluation de l'efficacité d'un arrangement des opérations d'inspection dans un processus de fabrication pour un plan d'inspection optimal. Le problème est identifié avec la conception d'un agencement optimal des opérations d'inspection dans un processus de fabrication. Il définit le processus de contrôle de la qualité comme un train d'opérations d'inspection, qui sont placées entre les activités de production d'autres types (fabrication, transport, stockage). L'optimisation du processus d'inspection de qualité est étudiée d'un point de vue statique, relatif à l'organisation de l'inspection. Elle comprend la conception d'un système de contrôle de qualité, ce qui assure le respect des restrictions concernant par exemple la conformité des produits avec le niveau de qualité requis et les conditions d'efficacité économique de l'entreprise.

Dans ce mémoire de thèse nous nous intéressons tout d'abord au produit, aux pièces, et à leurs multiples caractéristiques ainsi qu'au processus de fabrication et à ses paramètres. La performance des mesures par des moyens d'inspection est ensuite abordée avant l'allocation des activités d'inspection.

L'augmentation de la complexité des produits, rend les décisions cruciales à chaque étape de la conception pour assurer et maintenir la qualité finale attendue, le comportement et la fonctionnalité du produit, mais pas seulement.

La démarche de qualité doit être par conséquent soutenue par une approche globale capable de prendre en considération l'ensemble du cycle de vie du produit pour une utilisation systématique d'outils de qualité. Néanmoins le contexte industriel révèle un manque de communication entre les différents secteurs qui influe sur la qualité finale. Chacune de ces entités prend des décisions proches de leur terrain opérationnel sans avoir une vision stratégique dominante.

Le manque de formalisation des données et de modélisation de la démarche qualité engendre aussi des difficultés à intégrer les outils supports de la conception dans une approche stratégique globale où l'échange d'informations pourrait être pris en compte. En conséquence, en ce qui concerne la problématique de la planification d'inspection, le contrôle de conformité du produit et le suivi de processus sont généralement traités de façon indépendante et non d'une manière simultanée. La section suivante caractérise l'« idéal » du travail de recherche pour mieux aborder la solution de la planification d'inspection et positionne ainsi l'activité de planification des inspections, du contrôle de conformité et du suivi de processus de fabrication, dans le processus de développement du produit et son processus de fabrication.

1.5. Positionnement de l'activité de planification des inspections dans le processus de maîtrise des variations

La démarche de conception du produit et de son processus de fabrication a profondément évolué ces dernières années avec l'arrivée des outils numériques et de nouveaux enjeux industriels (Godot 2013). Sa structure est passée d'une vision séquentielle de ses étapes fondamentales à une tendance à l'intégration de celles-ci (Sohlenius 1992). Dans cette section sont abordées trois étapes essentielles de la démarche de conception du produit, de son processus de fabrication, et d'inspection, pour la maîtrise des variations. La Figure 9 présente une vue d'ensemble de ces trois étapes de la conception. Par la suite nous proposons trois scénarios d'intégration de celles-ci. Le présent travail ainsi que les travaux antérieurs effectués au sein du Laboratoire de Conception Fabrication et Commande consacrés à la maîtrise des variations se situent par rapport à ces scénarios. Cela nous permet d'envisager également des perspectives.

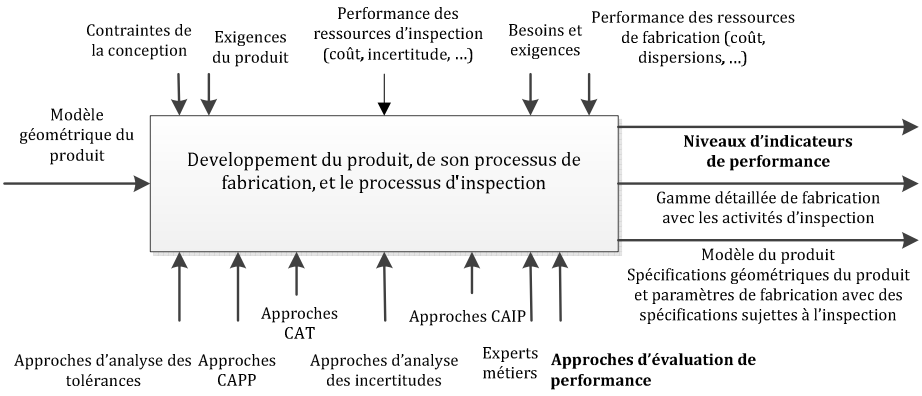


Figure 9. Diagramme d'activité de développement du produit, de son processus, et du processus d'inspection

1.5.1. Allocation des tolérances de produit et conception préliminaire du processus de fabrication

Afin de garantir un certain niveau de qualité des produits tout en réduisant les coûts de fabrication, la plupart des approches d'allocations de tolérance visent à déterminer les limites acceptables des écarts (variations) des caractéristiques des pièces par la répartition de l'intervalle de tolérance (Schmitt & Behrens 2007). Le besoin d'un tolérancement rapide et fiable ainsi que l'apparition des outils numériques en support de ces activités de tolérancement ont donné naissance à de nombreuses recherches en « Computer Aided Tolerancing » (Hong & Chang 2002). L'attribution ou la synthèse des tolérances fonctionnelles a lieu généralement au cours de la conception détaillée et impacte d'une façon significative la conception du processus de fabrication ainsi que celui d'inspection. Elle a pour but d'évaluer l'effet des variations géométriques des pièces par rapport aux conditions fonctionnelles, non-fonctionnelles, sécuritaires, et aux conditions d'assemblage (Qureshi 2011). Les impacts de l'attribution des tolérances sur la performance globale, le coût de fabrication et la qualité du produit, sont ensuite quantifiés. Ces deux concepts sont généralement considérés comme des objectifs contradictoires. Cela dit, la restriction des informations (sur le processus, les ressources, …) à ce stade, ne permet qu'une estimation approximative de la performance. Ces approches mettent l'accent sur l'exigence fonctionnelle et la satisfaction du client sans tenir compte des conséquences de tolérancement sur d'autres aspects de la performance notamment celle du processus de fabrication (coût, capabilité ...). Certaines approches sont fondées sur la fonction de perte de Taguchi, les équations paramétriques du coût de chaque tolérance attribuée, ou le coût de fabrication affecté par les tolérances (Chase et al. 1990) (Lööf et al. 2007). La Figure 10 détaille d'un point de vue général, cette activité d'allocation de tolérances.

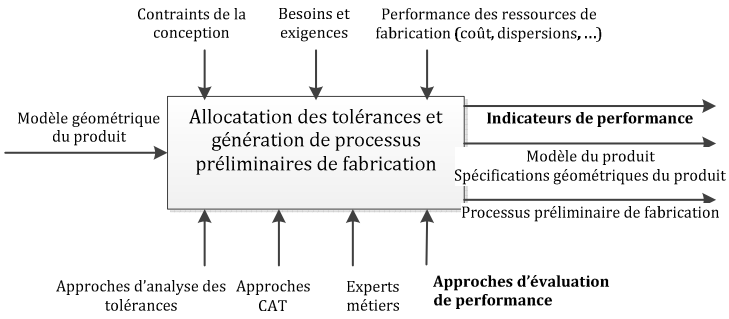


Figure 10. Diagramme d'activité d'allocation de tolérances

1.5.2. Conception détaillée de processus de fabrication et allocation des ressources

La planification des processus de fabrication vise à la détermination systématique des opérations par lesquelles un produit est fabriqué d'une manière économique et concurrentielle dans un environnement donné. Le but est avant tout de respecter les tolérances déjà attribuées lors de l'activité précédente puisque l'allocation des tolérances et la planification des processus de fabrication sont au final interdépendantes (Etienne et al. 2008). Parmi les critères d'un processus de fabrication, le coût de fabrication, la durée du processus, la qualité des produits … sont pris en compte. De multiples travaux de

recherche ont été consacrés au sujet « Computer Aided Process Planning » (Etienne 2007) (Hassan 2010). Ils parviennent, par leurs aptitudes, à déterminer les opérations de fabrication, la selection des procédés, des ressources et des moyens de fabrication, ainsi que l'évaluation des coûts de fabrication et la qualité du produit. En effet, le processus et ses ressources sont sélectionnés en fonction de la description du produit, tel que les matériaux, la structure et les tolérances.

Ainsi, les fabricants ont besoin de connaître les exigences des produits et la capabilité des ressources puisque les variations inhérentes au processus de fabrication et aux ressources impliquent une dégradation des caractéristiques du produit. En conséquence pour assurer un certain niveau de qualité, l'impact de la sélection des ressources de fabrication sur la performance globale ou le respect des spécifications doit être évalué. Lors de la détermination des procédés de fabrication, les fabricants prennent en compte les interactions entre le produit et les moyens de fabrication dans le but d'évaluer la qualité du produit et son coût. Le diagramme de l'activité « conception détaillée du processus de fabrication et allocation des ressources », illustre cette étape de la conception (Figure 11).

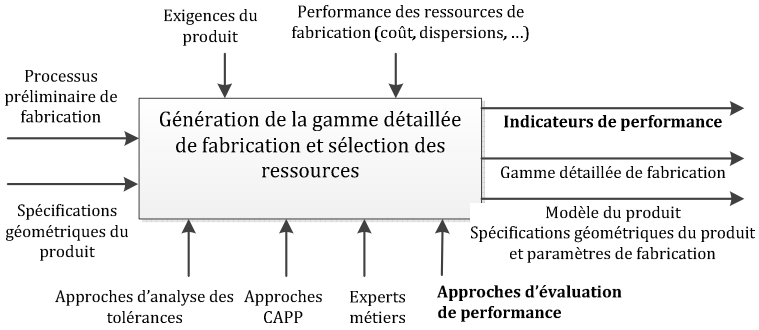


Figure 11. Diagramme d'activité de la conception de processus de fabrication et allocation de ces ressources

1.5.3. Génération de plans d'inspection et allocation des ressources

La génération d'un plan d'inspection se fait en règle générale à la suite de la conception du produit et de son processus de fabrication. Le développement des systèmes de « Computer Aided Inspection Planning » est donc la suite logique des travaux de recherche en CAT et CAPP (Figure 12).

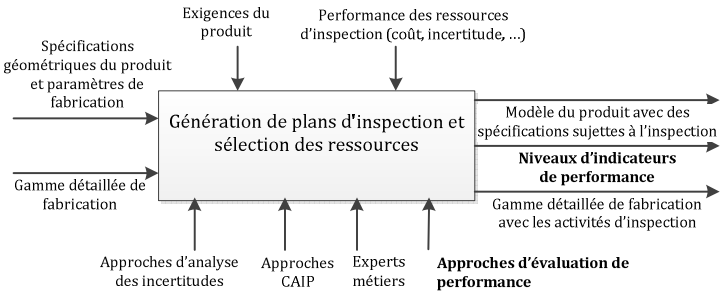


Figure 12. Diagramme d'activité de la génération de plans d'inspection et allocation de ces ressources

Le but est non seulement l'allocation des activités d'inspection, mais aussi une évaluation de la performance, notamment l'évaluation conjointe du coût et de la qualité

(qualité pondérée par le coût) (Etienne 2007), assurés par la détection ou la prévention de la défaillance survenue au niveau du produit ou du processus. Contrairement au stade de tolérancement, à ce stade les concepteurs disposent des informations nécessaires pour une évaluation précise de la performance. Durant cette étape de la démarche de conception les décisions précédemment prises lors des étapes préliminaires de la conception, impactent la fréquence (influence sur le coût de la métrologie) et la précision (influence sur le coût de l'erreur) requis par les activités d'inspection pour parvenir à un niveau acceptable de qualité. L'objectif visé de cette dernière étape de la conception est de fournir le meilleur rapport entre l'efficacité du plans d'inspection pour garantir la qualité et le coût associé (Figure 12).

1.5.4. L'intégration en conception

Le postulat de départ de ce travail de recherche est le suivant : « **L'ensemble des variations au niveau du produit, des pièces, du processus et de l'inspection sont étroitement liés (compatibilité du produit, processus de fabrication, processus d'inspection et ressources)** ». Malgré cette interdépendance des décisions prises tout au long du cycle de développement du produit, dans un contexte industriel, le constat démontre que : « Suivant l'approche classique, la planification de la qualité ne se réalise qu'en phase d'industrialisation » (Figure 13).

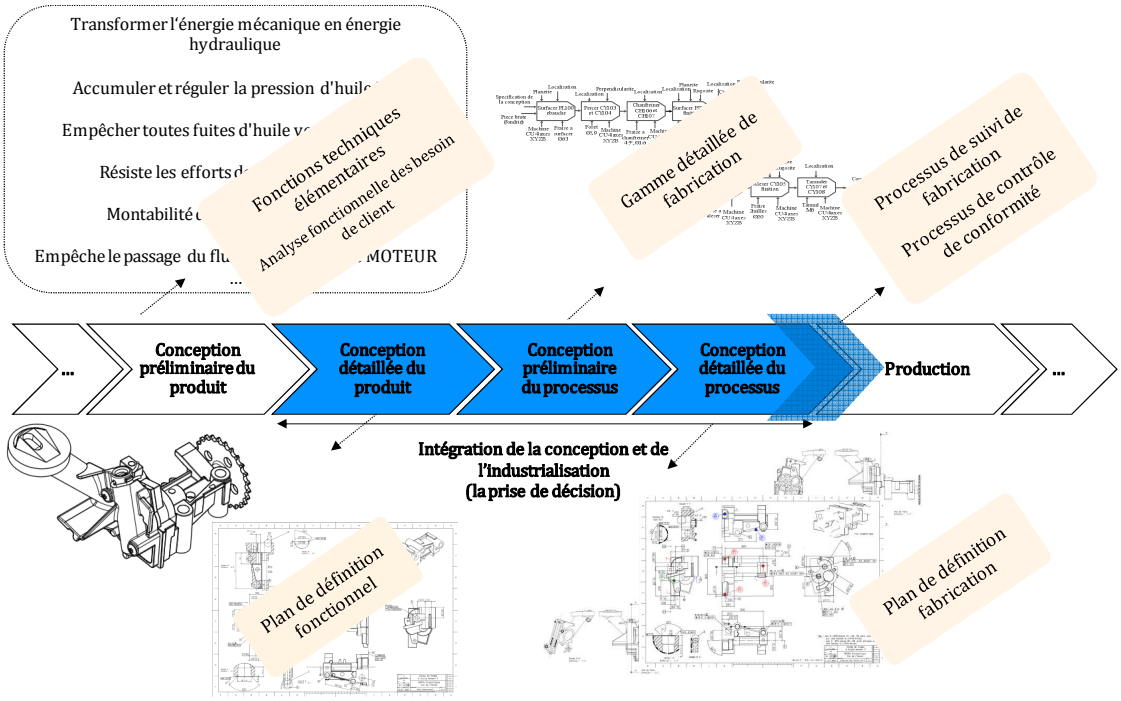


Figure 13. Contexte général du processus de la conception (vue traditionnelle)

Dans l'approche classique de la conception, lors de la conception détaillée du produit, le bureau d'études est déjà en mesure de prédire les caractéristiques susceptibles d'exiger un contrôle de conformité par le biais des outils du type Tableau d'Analyse Fonctionnelle Technique (TAFT) (Charpentier & Mathieu 2005) et Hiérarchisation des Caractéristiques Produit/Process (HCPP) (XP E 04-009 2003). Les tolérances serrées exigées par une chaine de cotes peuvent le déclencher. De même lors de la conception préliminaire du

processus de fabrication le bureau des méthodes alerte la nécessité d'avoir une bonne veille sur les opérations de la gamme de fabrication, comprenant également les opérations d'assemblage. Une capabilité faible ou un risque de dérive fréquente peut en être à l'origine. De notre point de vue, il est préférable que la planification d'inspection commence le plus tôt possible. L'intégration de la conception et de l'industrialisation est illustrée à la Figure 13.

Cependant les interdépendances motivent la conception intégrée du produit, son processus de fabrication et la planification d'inspection (Design for Manufacturing) (Roucoules & Skander 2004) (Skander 2006). Cela permet également de réduire le temps de développement du produit. Ce but ne sera atteint qu'en passant par des étapes intermédiaires, intégrant ces étapes de la conception au fur et à mesure, **tout en respectant les antériorités de l'approche classique**. Approcher cet idéal demande avant tout, l'intégration de l'industrialisation et la conception, un rapprochement de la planification du plan d'inspection à la conception détaillée du processus de fabrication (Figure 13).

Ce premier scénario constitue un objectif de ce travail de recherche. Il permet d'identifier les besoins pour l'intégration et la conception simultanées du processus d'inspection et celui du processus de fabrication. De même ce deuxième scénario pourrait indiquer les besoins et les contraintes d'une **conception conjointe de produit-processus-inspection**, troisième scénario de la Co-conception. Ces trois scénarios sont présentés associés à leurs données d'entrée et leurs attentes en sortie en Figure 14.

La section suivante a pour but de mettre en avant l'état de l'existant, des objectifs et des contraintes dans les industries et d'aborder des problématiques de recherche qui y sont liées pour la planification de l'inspection.

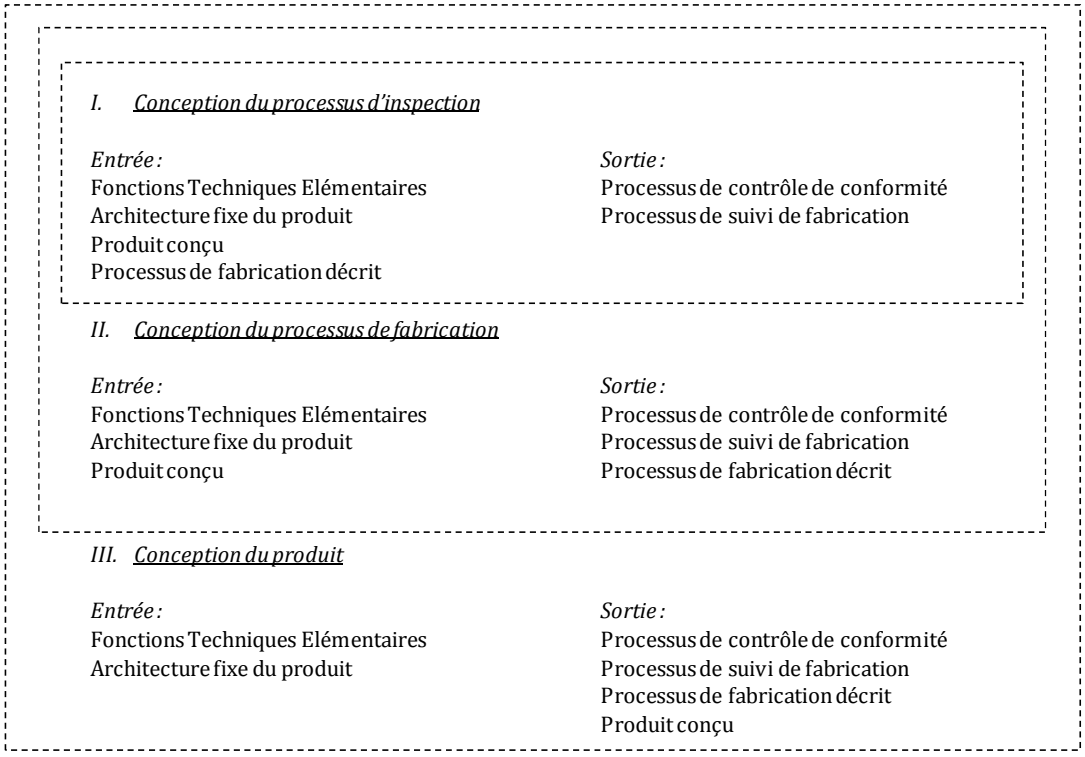


Figure 14. Trois niveaux d'intégration de la planification d'inspection dans le cycle de développement

2. Complexité et problématique du travail de recherche

Comme il a été souligné auparavant, les industriels tentent non seulement de garantir la qualité (la performance externe) vue de l'extérieur mais aussi d'atteindre leurs objectifs internes en matière de productivité, investissement, … dans le but d'améliorer la performance globale du système. Dans ce cadre, face aux variations, des efforts d'amélioration peuvent être menés aussi bien au stade de la planification d'inspection qu'au stade de la conception du produit et du processus de fabrication. Par ces travaux de recherche nous nous intéressons à l'inspection.

Dans le contexte actuel de qualité et d'optimisation des rendements de productivité et des compétences des entreprises, où des mesures de métrologie impactent le coût de fabrication, la maîtrise des risques, l'accroissement de l'efficacité de la production et …, la démarche qualité devient à la fois essentielle pour l'entreprise et aussi un facteur de progrès dans le cadre de l'amélioration continue.

Traditionnellement ces différentes exigences ont été considérées comme des alternatives exclusives. Le client ne pouvait pas s'attendre à une haute qualité et à un faible coût (Gregory 1993). À ce jour une entreprise n'est considérée efficace et viable à terme que si elle répond à toutes ces exigences simultanément. Cela prouve la nécessité de l'intégration de ces deux visions interne et externe. Malgré la multitude des recherches effectuées dans ce domaine de l'optimisation, les entreprises peinent à évoluer dans leurs pratiques en ce sens. Pour résoudre ces enjeux, les industriels misent beaucoup sur la prévention et la détection, autrement dit l'inspection.

Sur le plan de la prévention, l'objectif de la surveillance du processus de fabrication est de garder le produit sur la cible, à travers la maîtrise de l'évolution des paramètres de fabrication, et sur le plan de la détection le but du contrôle du produit est de détecter le produit hors tolérance, non seulement au regard des caractéristiques, mais surtout de la fonctionnalité, à travers un ensemble de caractéristiques. La première permet de réduire le coût de la détection de défaillance, tandis que la deuxième limite le coût de prévention de défaillance tout en garantissant un certain niveau de qualité, l'objectif principal d'un plan d'inspection. Nous abordons par la suite certaines critiques sur l'organisation et la mise en place d'un plan d'inspection au sein des entreprises. La planification de ces deux facettes de l'inspection est généralement affectée par un manque de dialogue, d'échange d'expériences, et de capitalisation des données entre différents secteurs et parties prenantes. Ces éléments sont également souvent retrouvés dans la littérature.

La pratique actuelle des entreprises pour garantir la qualité est souvent basée sur des approches opérationnelles mises en place d'une façon non systématique. De multiples approches peuvent être exploitées simultanément pour chaque élément du triptyque produits-processus-outils (Bassetto 2005). Elles sont récapitulées comme des approches génériques à travers les points venant ci-après. Vue le contexte légèrement différent de la référence bibliographique, ces points ont été adaptés à la vue globale de ce document. Ils sont considérés comme des points d'amélioration possibles auxquels une planification efficace d'inspection pourrait répondre d'un point de vue opérationnel :

- En matière d'outils de fabrication, l'amélioration se traduit par le choix d'outils plus robustes. Ce choix se fait d'une manière générale au cours de la conception du processus.
- Au niveau des produits, des contrôles peuvent être planifiés a posteriori ou en cours de production. En cas d'apparition de défaillance, les origines seront déterminées et les actions correctives seront mises en place.
- Au niveau des processus, des plans d'action préventifs ou correctifs peuvent être établis pour maintenir les opérations exactes et précises.

Les deux derniers se mettent en place souvent d'une façon très dispersée et non structurée tout au long de la conception.

En même temps d'un point de vue organisationnel (stratégique):

- Le retour d'expérience (feedback) joue un rôle important dans le but d'apporter de l'amélioration au niveau de la conception du produit et de son processus.
- La tendance à une conception intégrée (anticipée) lors de la conception du produit, en tenant compte des moyens de production, pourrait garantir des produits robustes et améliorer la qualité.

L'implémentation de ces approches doit être généralement menée en parallèle pour une meilleure performance, et en accord avec un plan d'inspection qui comprend un nombre maximum de points décrit précédemment. La pratique actuelle des entreprises est rarement menée d'une façon systématique malgré la quantité massive d'information. Cela n'aboutit pas à une amélioration continue mais à un cercle vicieux sans aucun résultat à long terme. Une approche holistique de la prise de décision sur l'ensemble du système, l'inspection, le processus, le produit …, demande une démarche rigoureuse, face à la quantité massive d'informations fournies par les multiples étapes de la conception au sein d'une même entreprise. Idéalement l'approche devrait intégrer le modèle de produit et les paramètres du procédé et soutenir ainsi le traitement des connaissances métiers recueillies au sein de l'entité industrielle. Cette contribution significative de ce point de vue organisationnel est souvent sous-estimée dans le contexte actuel.

Selon la nature du produit et la stratégie d'entreprise, la connaissance des experts serait plus ou moins précise et capitalisée. Pour mettre de l'ordre dans tout cela, la définition d'une méthodologie s'impose.

Une méthodologie de la prise de décision, support pour la génération d'un plan inspection d'un point vu organisationnel devrait donc :

- Prendre en compte plusieurs critères pour la quantification du risque
- Être opérationnelle / adaptable / souple pour ce qui est de la précision requise et des connaissances des experts disponibles

La génération d'un plan d'inspection dans le cadre de l'amélioration continue pourrait réduire les incertitudes/risques. Les décisions pour la génération d'un plan d'inspection sont sensiblement affectées par les informations recueillies tout au long du cycle de vie du produit. Ainsi il est important de bien définir les étapes de la conception associées aux

informations qu'elles délivrent ou celles dont elles ont besoin. Autrement dit les antériorités des étapes de la conception déterminent les données disponibles pour la prise de décision.

La prise de décision que nous souhaitons élaborer à travers ce travail, se déroulera donc lors de la conception détaillée lorsque le produit et le processus de fabrication (la gamme de fabrication …) sont conçus. Toutes les descriptions de produits, de processus, de moyens de production et leurs performances sont considérées comme des données d'entrée de cette activité. Dans un deuxième temps en perspective la question se porte sur la possibilité de situer la démarche décisionnelle dans la phase de conception préliminaire en faisant l'hypothèse d'avoir le produit déjà conçu et le processus de fabrication non conçu. Cela permet de réordonnancer la gamme de fabrication. Dans la suite, grâce à la connaissance obtenue, la question à laquelle il faudra répondre est la suivante: Est-il et comment est-il possible d'avoir la prise de décision pour concevoir le plan d'inspection lors de la conception du produit ? Le troisième scénario résumerait idéalement toute la démarche de la conception en un seul processus pour une Co-conception du plan d'inspection, le processus de fabrication et le produit. La maîtrise simultanée des variations et de la qualité du produit et du processus peut s'étendre tout au long du processus de conception.

Le contrôle de la conformité du produit n'améliore pas en soi le produit mais vérifie sa qualité. Il est traditionnellement réalisé par l'inspection de la qualité a posteriori du processus de fabrication dans la plupart des systèmes de production (Liu et al. 2009). Le contrôle de qualité ne cherche pas à identifier les dérives du processus (causes), mais il "attend" une apparition des défaillances (conséquences) afin de mettre en place des actions au niveau du processus. Assurance de la qualité tend de plus en plus à émerger du produit (Liu et al. 2009) en une prévention de défaillance ou même à la détection la plus proche de la cause. En effet, il semble insuffisant de traiter la planification de suivi de fabrication et celle de contrôle de conformité du produit séparément. Cela est la préoccupation principale de la proposition, qui comprend de multiples directives opérationnelles.

La défaillance des fonctions au niveau du produit ou du procédé peuvent être la conséquence ou la cause, en fonction du niveau de décomposition du système (Bassetto et al. 2011). Une hypothèse de ce travail est de mettre en relation le risque de causes (l'intérêt de la surveillance) et celle des conséquences (l'intérêt du contrôle de la conformité). Elle nous permet également de minimiser le coût de l'inspection en liant les deux et réduire à la fois les activités de contrôle et les activités de surveillance. En procédant de cette façon le contrôle des produits et le plan de surveillance du processus sont amenés à être générés simultanément.

D'un point de vue stratégique, ce mémoire de thèse entend trouver un compromis entre le suivi de la production et le contrôle de conformité. D'un point de vue économique, (Kunzmann et al. 2005) démontre l'évolution du coût de la prévention de la défaillance, l'objectif de la surveillance du processus, et celui de la détection et de l'élimination de la défaillance, ainsi que l'objectif de contrôle de conformité des produits, tout au long du

cycle de vie du produit. Que ce soit par la détection ou la prévention de la défaillance, la génération d'un plan d'inspection a pour but d'assurer la conformité du produit au client (qualité perçue en externe) pour un moindre coût d'inspection (objectif en interne).

Cela conduit à une idée selon laquelle, une industrialisation idéalement réussie serait celle qui assure la conformité du produit avec ni le contrôle de conformité du produit, ni le suivi de fabrication (Pillet et al. 2007). Ces derniers représentent les principaux axes d'amélioration autour desquels ce travail est structuré. Afin de se rapprocher de cet idéal la « génération du processus d'inspection » vise à trouver le meilleur compromis (valeur) entre l'efficacité du plan d'inspection et le coût associé. Dans un premier temps l'idée est de réduire le nombre des caractéristiques sujets d'inspection.

Cela réside principalement sur deux terrains de recherche à privilégier ;

- L'intégration de la planification du contrôle de conformité du produit et celle de suivi du processus de fabrication. Il s'agit de la planification conjointe des tâches de suivi de fabrication et de contrôle de conformité, établissant des liens entre les spécifications du produit et les paramètres du processus de fabrication.
- Ne laisser subsister que les propriétés du produit, des pièces, du processus de fabrication et des ressources qui impactent de manière importante, la qualité et le coût final, ainsi que la fonctionnalité, la perception du produit ou la sûreté du produit.

Ces points abordent une question essentielle, décisive pour la démarche de la génération de plans d'inspection :

- Quoi contrôler?

La démarche se poursuit par deux parties générales, formalisées par les grandes questions suivantes (Pfeifer 2002) :

- Comment contrôler?
- Quand contrôler ?

Dans la pratique industrielle ces trois questions sont abordées d'une façon non structurée et les éléments de réponse sont basés sur des connaissances métier non capitalisées. Répondre à ces trois questions ne se fait donc pas d'une façon successive mais d'une façon désordonnée.

3. Conclusion

A travers ce chapitre nous avons mis en avant les concepts fondamentaux tels qu'incertitude, variation, exigence, caractéristique, … qui entrent dans le contexte global d'inspection. Ces dernières jouent un rôle très important dans un contexte d'amélioration de la performance. Notamment la vérification et ses dimensions multiples ont été mises en avant ; la détection, la prévention, … . Une brève critique des pratiques actuelles des entreprises nous a montré à la fois la nécessité d'établir un plan d'inspection mais aussi sa désorganisation au sein des entreprises. En conséquence pour bien situer le travail présent dès le départ, les étapes de la conception ont été décrites ainsi que leurs

données d'entrée nécessaires à la prise de décision en ce qui concerne deux facettes majeures de l'inspection : le contrôle de conformité du produit et le suivi du processus de fabrication. La problématique a été définie autour de ces deux axes. Nous avons résumé la problématique par trois grandes questions : **Quoi contrôler ? Comment contrôler ? Quand contrôler ?** Elles tiennent en effet le cadre de la prise de décision.

En synthèse pour l'élaboration d'un plan d'inspection le but est d'éviter la sous-qualité autant que la sur-qualité, l'inspection trop fréquente ou trop tardive, … compte tenu de la conception du produit, de son processus de fabrication, et de la performance des moyens et ressources disponibles. Dans ce cadre les informations et connaissances nécessaires pour y répondre doivent être exploitées par les outils adéquats. Afin de mieux répondre aux trois grandes questions, précédemment identifiées, proposées comme l'idée préliminaire de notre travail de recherche, le chapitre suivant présente une revue des exigences relatives à la planification d'inspection. La nécessité de ces exigences pour d »finir au final un plan d'inspection optimal, quelle que soit la démarche de son élaboration, est déduite. Cela détermine les exigences et critères de l'analyse de l'état de l'art sur des approches, méthodes, et outils de la prise de décision. Au regard de ces derniers les méthodes et outils usuellement utilisés pour la planification d'inspection sont détaillés.

Chapitre II – Etat de l'art, expérimentation, et synthèse

L'élaboration des objectifs opérationnels et stratégiques et la déduction de la problématique de recherche, permet de développer des exigences et des critères qui doivent être pris en compte pour l'analyse de l'état de l'art. Pour répondre aux trois grandes questions de la problématique, le but de cet état de l'art est de donner, non pas une liste exhaustive des approches, méthodes, ou outils déjà existants, qui pourraient potentiellement y répondre mais plutôt une vue d'ensemble de ceux-ci pour mieux les classer en fonction de nos objectifs. Par la suite ces derniers sont détaillés et critiqués par rapport à leurs finalités, structures, et déploiements. Pour une meilleure représentation et analyse de l'état de l'art, ainsi qu'un meilleur jugement sur l'aptitude des méthodes et des outils, un cas industriel simplifié (commun) est proposé. La synthèse de ce chapitre met en avant non seulement les outils et les méthodes aptes à répondre aux attentes mais confirme aussi l'identification et la définition des exigences et des critères dans le cadre de la génération d'un plan d'inspection puisqu'ils sont traités par la majorité d'entre eux. Ces attentes affirmées nous conduisent à la définition des grands axes d'un cadre général d'un plan d'inspection pour la co-conception de contrôle de conformité et de suivi de fabrication.

1. Les exigences et critères d'analyse de l'état de l'art

Ce chapitre présente un état de l'art des outils et des méthodes existants qui pourraient intégrer la prise de décision pour la planification d'inspection. Il débute par :

- la définition des exigences attendues des outils et des méthodes de la littérature à partir des objectifs opérationnels et stratégiques de la planification d'inspection, identifiés dans le chapitre précédent.

Et continue par :

- la proposition d'une vue globale des outils et des méthodes existants,
- l'expérimentation et la présentation des outils et des méthodes avant de les détailler,
- et la synthèse des outils qui s'appuie sur des exigences de l'état de l'art argumentées ci-dessous.

Le chapitre précédent a présenté les objectifs opérationnels et stratégiques des activités d'inspection. Les objectifs opérationnels soulignaient notamment la co-conception du plan de contrôle de conformité du produit et des pièces, et le suivi du processus de fabrication. C'est-à-dire qu'une activité d'inspection peut être destinée à :

- la surveillance des paramètres opératoires du processus de fabrication, par l'application des mesures au niveau du processus même, ou par l'application des mesures sur des spécifications au niveau de la pièce fabriquée par le processus (mais toujours dans le but de maintenir le processus sous surveillance),
- le contrôle de conformité des spécifications des composants au regard de leur conception et de leurs limites de tolérance, et
- le contrôle de conformité des fonctionnalités ou exigences attendues du produit selon le cahier des charges.

L'inspection peut prendre donc de multiples dimensions : il peut s'agir d'un contrôle de conformité du produit, d'une maintenance régulière ou occasionnelle, du suivi d'un indicateur,.... La co-conception du contrôle de conformité et du suivi de fabrication, a été argumentée par le fait qu'un processus de fabrication « sous contrôle » par un suivi régulier de ses paramètres peut réduire en soi le contrôle de conformité des pièces ou du produit, qui sont issus du processus de fabrication. Cela contribue à la prévention de la propagation des défaillances et pour les stopper au plus près de leur origine (Schippers 2001) (Feigenwald et al. 2011). En revanche le contrôle de conformité des pièces ou du produit peut palier le manque de surveillance du processus, et est nécessaire pour la sûreté de fonctionnement du produit, bien que la prévention soit souvent préférable à la protection.

Cette inspection dite multi-niveaux contribue à la satisfaction de multiples objectifs. Ces multiples objectifs stratégiques doivent être pris en compte pour la planification de l'inspection, comme pour d'autres étapes de la conception. Lors d'une prise de décision pour la mise en place des objectifs opérationnels, les objectifs stratégiques prennent la forme de critères, de contraintes, ou de déclencheurs de la prise de décision. Ces critères sont souvent interdépendants. A titre d'exemple lorsque les activités d'inspection du type

« suivi de fabrication » sont fréquemment réalisées au cours du processus de fabrication la productivité de la chaîne de fabrication peut diminuer nettement par rapport à un cas où les activités d'inspection se résument au contrôle de conformité du produit en fin de chaîne. Le deuxième cas garantit certes la qualité mais dans le cas d'une détection de non-conformité ne permet pas forcément un diagnostique de l'origine de celle-ci.

A noter que l'objectif stratégique global de la conception d'un système de fabrication est sans doute le retour sur investissement. Axiomatique Design (AD), qui aide la génération et la sélection des solutions de conception appropriées, a été déployé par (Cochran & Rudolf 2003) pour la conception des systèmes de fabrication dans le cadre de l'amélioration continue (Lean Manufacturing, …). Ils proposent "Manufacturing System Design Decomposition" (MSDD), essentiellement pour la décomposition des objectifs stratégiques identifiés liés à la satisfaction des clients, l'augmentation de la productivité (réduction de la maintenance ...), la réduction des coûts ... (Feigenwald 2012) (Vasseur & Magne 2006). Ainsi les critères stratégiques, essentiels pour une prise de décision opérationnelle, sont évoqués. Par le présent travail, ces multiples critères seront décomposés et traduits au niveau du produit, du processus de fabrication, et de l'inspection comme suit :

Au niveau du « produit », le principal critère considéré est la fonctionnalité de l'ensemble des composants et la satisfaction du client mais pas seulement. Les exigences peuvent être aussi non-fonctionnelles comme la sécurité, la durée de vie, etc. Elles déclenchent généralement les activités de contrôle de conformité pour la détection ou la vérification des exigences du produit, ou en partie pour assurer la fonctionnalité attendue. A noter que le contrôle de conformité est le dernier aléa interne de l'entreprise vis-à-vis des clients pour éviter que les défaillances survenues au cours de la fabrication n'affectent ces derniers.

Au niveau du « procédé » de fabrication qui assure la réalisation des exigences et des spécifications, les capabilités des opérations de fabrication, et le taux de non-conformité du produit sont des critères globaux. Ils déclenchent les activités de suivi de fabrication pour la prévention des dérives au niveau du processus de fabrication, ou pour la détection des défaillances au niveau du produit, mais toujours dans le but de détecter les anomalies apparues lors de la production ou d'anticiper celles-ci par la surveillance. Il s'agit souvent d'anticiper l'apparition éventuelle de dérives et de dysfonctionnement du processus. La surveillance effective du processus peut éviter la détection tardive de la défaillance et une confrontation des entreprises à une mise au rebut importante des produits non-conformes. La mise en place optimale des activités correctives (ex. maintenance corrective), suite à une détection de dérive par la surveillance, empêche toute cette perte.

Quelle que soit la nature de ces activités, préventive, détective, ou corrective, au niveau de l'« inspection » de multiples critères sont décisifs, en particulier pour la sélection des ressources, des modes, et de la fréquence des activités du contrôle de conformité et du suivi de fabrication. Parmi ces critères, la capabilité des moyens d'inspection, la rapidité de détection, leur efficacité étant donné les risques (incertitude de contrôle), les coûts d'inspection etc. se distinguent particulièrement et ont un impact significatif sur la génération de processus d'inspection. Ils sont souvent réunis sous la cape de la

performance d'inspection et de mesure. De nombreuses études (Collège Français de Métrologie 2009) et normes (ISO 9001 2008) démontrent l'utilité de la surveillance des processus de mesure et de la prise en compte de certain critères et indicateurs de performance : « un ensemble d'actions intervenant à la suite des différentes étapes préalables à son choix et utilisation (validation du processus de mesure, estimation des incertitudes de mesure, des capabilités, du risque industriel...) visant à s'assurer du maintien de ses performances dans le temps ». Cela a pour but de déterminer des erreurs systématiques ou hasardeuses (accidentelles) à prendre en compte dans les calculs d'incertitudes. Lorsqu'un moyen de mesure est « acceptable » l'organisme peut (comme l'indique la norme ISO 9001 : 2008) démontrer son aptitude à fournir régulièrement un produit conforme aux exigences des clients et aux exigences réglementaires.

L'interdépendance des critères de la prise de décision et les choix (des variables de conception) impacte l'élaboration du plan d'inspection : le coût d'inspection et la fréquence de mesure, le coût d'inspection et l'incertitude (ou la non-détectabilité) de mesure, la capabilité du processus de fabrication et la fréquence de mesure, etc. Une prise de décision, pour répondre aux trois grandes questions évoquées dans le chapitre précédent, nécessite alors une **« Analyse multicritères »** pour la génération d'un plan d'inspection.

Dans ce contexte, notamment pour répondre à la première question, « quoi contrôler ? », l'idée préliminaire est la proposition d'un compromis entre le sous-contrôle et le sur-contrôle. Il s'agit d'assurer la qualité par l'inspection sans excès sur le coût par la multitude des activités d'inspection. En même temps, ces critères prennent différentes formes à travers un contexte **« Multi-niveaux »**. Cela motive la conception conjointe du contrôle de conformité de produit et du suivi de fabrication **par l'exploitation des liens entre les exigences relatives au produit, les spécifications de la pièce à contrôler, et les paramètres de processus à suivre auquel les paramètres des ressources sont liés indirectement.**

La détection des défaillances apparues au niveau des fonctions attendues du produit n'est possible que par des activités de contrôle de conformité. Cependant ces exigences de conception sont traduites en paramètres et étapes du processus de fabrication. La prévention des variations du processus de fabrication ou bien la correction des paramètres à l'origine de ces variations peuvent être effectuées suite à : soit le suivi de fabrication, soit le contrôle de conformité des caractéristiques de la pièce affectées par les paramètres de processus en question.

Un processus parfaitement maîtrisé au regard des variations garantit la conformité des exigences et un produit fonctionnel sauf en cas d'erreur de mesure due à l'incertitude (exactitude et précision). Un processus maîtrisé sous-entend souvent une inspection répandue et fréquente au cours de la fabrication. À savoir que dans ce cas la productivité diminue d'une façon drastique. En revanche, les produits contrôlés à 100% en fin de chaîne de fabrication, démontrent le bon déroulement du processus. Dans ce cas, mise à part l'erreur de mesure, en cas de détection fréquente (systématique) de défaillance, un arrêt de production s'impose afin de mener une investigation sur la cause de la défaillance. Les produits défectueux sont nombreux lorsqu'une anomalie est présente au niveau du

processus quand elle n'est détectée que (trop) tardivement. En outre, ces produits défectueux, étant restés dans la chaîne de production, augmentent le coût (de mise au rebut et de re-fabrication) pour moins de productivité. Une hypothèse de ce travail est donc de mettre en relation les causes (l'intérêt du suivi de fabrication) et les conséquences (l'intérêt du contrôle de conformité). Cela nous permet également de minimiser le coût total d'inspection en les liant tous les deux derniers et en diminuant les activités d'inspection au juste nécessaire.

Les exigences évoquées sont inspirées de l'état de l'art relatif à l'identification des facteurs d'appréciation de l'exhaustivité des outils et méthodes. En conclusion, dans notre synthèse des outils, méthodes, ou approches, nous proposons trois facteurs d'appréciation :

- La capacité de mener une analyse multicritères compte tenu de la nature des critères évalués permettant une évaluation du coût, de la qualité et du risque voire de la performance conjointe. En fonction de l'outil, l'évaluation des critères peut être qualitative, quantitative, implicite ou explicite.
- La capacité de mener une analyse multi-niveaux, qui traite à la fois les fonctions, les spécifications et les paramètres aux différents niveaux (produit, pièce, processus, ressource). La question qui se pose par la suite est relative à la causalité (des relations causales) qui peut être prise en compte ou exprimée de multiples façons, qualitatives, quantitatives, ou autres (le niveau de la sensibilité, le niveau d'impact, …).
- La facilité de mise en œuvre, considérée comme une exigence indispensable par les entreprises. Pour certains outils, la difficulté de mise en œuvre freine largement leur implémentation dans le milieu industriel.

La difficulté rencontrée lors du choix de l'outil, de la méthode ou de la technique vient du fait que répondre à l'ensemble de ces facteurs souvent contradictoires demande un compromis entre l'exhaustivité des évaluations, la précision requise des évaluations, et la difficulté de mise en œuvre. Par la suite, les approches, méthodes et outils de qualité sont introduites. La section suivante contribue à structurer l'état de l'art, ainsi qu'à proposer des outils et des méthodes par trois approches globales.

2. Vue globale des approches, méthodes, et outils de la littérature

Avant toute chose, la diversité des concepts, approches, démarches, méthodologies, méthodes, et outils, qui pourraient contribuer à la génération d'un processus qualité, impose leur définition (Perilhon 2004) (Conférence de J.F. Vautier). À savoir que ces définitions dépendent fortement du point de vue et du niveau de complexité ou de précision.

- Démarche : la manière dont une solution est développée (démarche de la prise de décision pour la génération de plans d'inspection).
- Approche : la manière dont on va aborder une problématique par le choix d'une méthode, pour une approche il peut y avoir plusieurs méthodes.
- Méthodologie : une réflexion centrée qui oriente le choix des méthodes inscrites dans une approche donnée.

- Méthode : une organisation des opérations à exécuter dans un ordre précis.
- Outil : un moyen de mise en œuvre de toutes ou certaines opérations de la méthode. Le but d'un outil est donc l'application d'une méthode sur le terrain d'une manière opérationnelle. Dans ce cas l'outil et la méthode sont souvent intitulés de la même façon puisque l'outil exécute toutes les opérations de la méthode.

La qualité a toujours été l'objectif final de tout système quel que soit le moyen d'y parvenir : une démarche de la qualité, une approche, une méthode, ou un outil d'implémentation. Au cours des trois dernières décennies, le concept de qualité a profondément changé. Partant d'une vision locale très centrée sur le respect des spécifications du produit, il s'agit maintenant d'une vision plus globale axée sur l'amélioration de la performance industrielle non seulement pour la satisfaction du client mais aussi pour la maîtrise des coûts. Plusieurs étapes sont à l'origine de ces évolutions que l'on peut citer sans toutefois pouvoir être exhaustif. À noter que leur évolution au fil du temps a souvent pris un aspect de plus en plus large. Les entreprises également se tournent de plus en plus vers des approches ou démarches globales (des outils de cartes de contrôles et l'analyse de Pareto, aux méthodes de MSP et AMDEC, aux méthodologies comme QFD et Six Sigma, jusqu'aux approches telles que TQM).

- L'arrivée de la notion de qualité totale (TQM : Total Quality Management) (Bunney & Dale 1997) (Evans & Lindsay 1999) (Stephens 1997) (Wilkinson et al. 1998) qui permettait de dépasser la simple conformité.
- L'ISO 9000 d'abord organisée en chapitres afin de prévenir les principales sources de défaillances, puis avec une vision processus davantage tournée vers le client et avec un souci de performance industrielle (Bradley 1994) (Gotzamani & Tsiotras 2002) (Huarng et al. 1999) (Sun 2000) (Withers & Ebrahimpour 2000).
- La démultiplication de l'utilisation des outils statistiques et méthodologiques comme les plans d'expériences (DOE : Design Of Experiments) (Taguchi 1987), la Maîtrise Statistique de Processus (Statistical Process Control) (Montgomery 1991), le QFD, l'AMDEC (Analyse des Modes de défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) ; (en anglais, FMEA)…
- L'intégration des notions d'amélioration continue (Continuous improvement) telles que le Kaizen (Imai 1986).
- L'intégration de démarches de progrès permettant d'organiser les différents outils en les positionnant par rapport à une approche de gestion par projet telles que Six Sigma, Design for Six Sigma (Yang & El-Haik 2003) …
- Les pratiques de « Lean Management » (Arnheiter & Maleyeff 2005) (Salah et al. 2010) qui recherchent la performance, et l'agilité de l'entreprise.
- La gestion des risques de variations telle que KCs qui se focalise sur l'amélioration de la qualité durant la conception et l'industrialisation du produit.

Parmi ceux-ci, les approches *TQM, Six Sigma* et *Lean management* semblent être les plus répandues dans les entreprises. Dans la perspective de maîtrise de qualité (Deeb 2008) propose une structure pour TQM, perçue habituellement dans la littérature comme un système qui comprend des outils, des méthodes et des techniques pour soutenir certaines

valeurs fondamentales (core values) communes, dans les systèmes de gestion (Shoji et al. 1997), (Bunney & Dale 1997). Cette vision a été développée par (Hellsten & Klefsjö 2000) qui décompose le système en trois composantes mutuellement dépendantes, les « valeurs fondamentales », les « Outils et méthodes», et les « techniques et méthodologies ». La Figure 15 reprend ces grands axes.

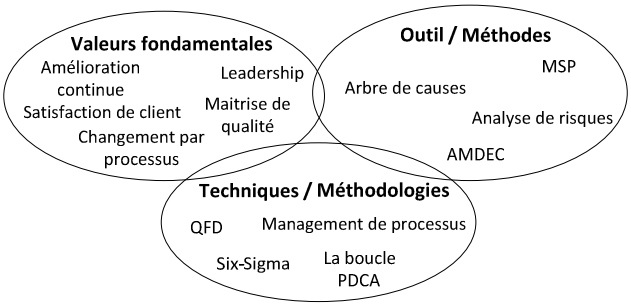


Figure 15. TQM, les grands axes d'un système de management (Hellsten & Klefsjö 2000)

Cet état de l'art est consacré premièrement aux « outils et méthodes » opérationnels (et non pas managériaux) qui contribuent à la satisfaction des « core values », notamment la maîtrise de qualité correspondant à la première question essentielle, de la démarche de la génération de plan d'inspection : quoi contrôler ? Par le présent travail, la « Maîtrise de la qualité » est considérée comme une approche à elle seule. Pour y répondre de multiples outils et méthodes pourraient intervenir telles que le Tableau d'Analyse Fonctionnelle Technique (TAFT), AMDEC, QFD, l'étude de la capabilité, la Matrice d'impact ... . Leur utilisation dans le but de répondre à cette première question est appelée « l'identification des exigences » par (Etienne 2007). Ces exigences font potentiellement l'objet d'inspection. Pour confirmer leur importance et répondre à cette première question, l'identification des exigences doit être par la suite associée à une analyse qui permet de suivre l'effet du respect (ou du non-respect) des exigences sur le produit final. L'approche qui englobe les outils et méthodes permettant cette analyse est l'approche de « Maîtrise de variations ». Il s'agit de l'analyse up-ward ou down-ward d'une dérive ou d'une défaillance pour l'identification des impacts ou des origines de celles-ci sur le système entier. Cela apporte une vision holistique des variations. Les outils et méthodes tel que KC Flowdown inspiré de cette approche sont également revus.

Il est à noter que la qualité à elle seule, est loin d'être représentative de la performance globale d'un système. Cela nécessite l'intégration d'autres dimensions dans la prise de décision : le coût, le risque de défaillance « la probabilité de disfonctionnement d'un produit ou d'une pièce ou la probabilité qu'un produit ou une pièce soit défectueux (Hassan 2010) » …. Tenant compte de ces dimensions une autre approche est identifiée à travers la littérature existante pour répondre aux questions suivantes : « comment contrôler ? », « quand contrôler ? ». Cette approche, l'« Evaluation des performances », ainsi que ses outils et méthodes sont également détaillés dans ce chapitre. Ceux qui sont peu ou pas catégorisés dans la littérature, sont les outils et méthodes d'évaluation conjointe des performances. Cette évaluation conjointe est judicieuse lorsqu'un système n'est supposé optimal que s'il est optimal sur le plan économique, sur le plan dela qualité fournie à long et court termes, et sur le plan du risque associé. Une

première appréhension des outils et méthodes existants dans la littérature qui suivent cette approche, est de savoir s'ils réunissent le coût, la qualité et le risque.

Contrairement à la suite logique suivie par ce travail de recherche, c'est-à-dire l'analyse détaillée de chaque outil ou méthode avant une analyse globale, leur positionnement et leur classification sont d'abord proposés. Cela permet une meilleure organisation de ce chapitre sur l'état de l'art. La Figure 16 propose un positionnement des outils, méthodes, et approches de cet état de l'art selon les critères de la performance qu'ils évaluent. À noter que dans le travail de recherche présent le délai, perçu comme une facette importante de la performance, est balayé par le critère de coût. Nous y trouvons des outils principalement destinés à l'évaluation d'un critère, mais qui contribue également à la maîtrise de d'autres critères (Capabilité inertielle, Grille d'AMDEC). Ensuite la Figure 17 répertorie trois approches principales autour desquelles cet état de l'art est structuré : Maîtrise de qualité, évaluation des performances (notamment coût-qualité), et maîtrise de variation (Variation Risk Management).

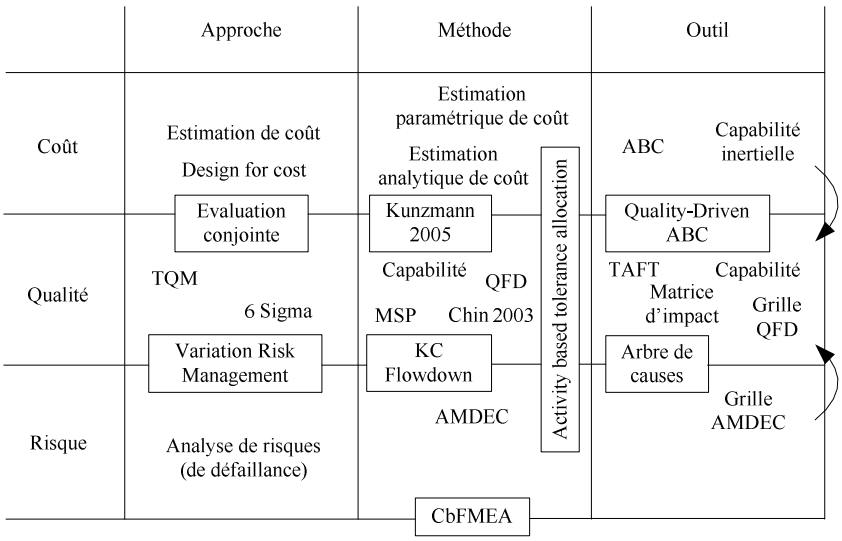


Figure 16. Positionnement des outils, méthodes, et approches de l'évaluation de la performance

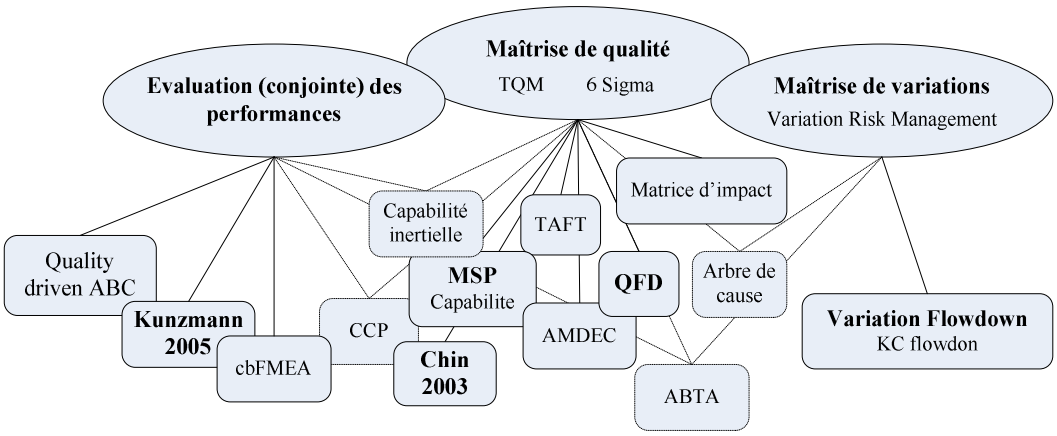


Figure 17. La classification des outils et méthodes de la littérature selon leurs approches

Un état de l'art sur les outils existants et les approches traditionnelles, offre une vision sur leur adaptabilité au contexte d'inspection et leurs complémentarités, en ce qui concerne les exigences en matière de processus décisionnel; multicritère et multi-niveaux.

D'après (Shamsuddin & Masjuki 2003) TQM (Total Quality Management) ou la maîtrise de qualité ne peut pas être assurée sans application des outils et techniques appropriés et adaptés selon le domaine d'application. Cela est valable pour toutes les approches. (Bunney & Dale 1997) soutient également l'idée de la nécessité de l'utilisation et de la sélection des outils et des techniques de gestion de la qualité pour soutenir et développer les processus de l'amélioration de la qualité.

De même l'approche de l'évaluation des performances comprend de multiples outils qui ont pour objectif la co-évaluation de plusieurs performances (généralement antinomiques) pour une meilleure prise de décision. A titre d'exemple (Kunzmann et al. 2005) évalue le coût de la qualité engendré par celle-ci. L'évaluation simultanée du risque et du coût rejoint la même problématique pour proposer le meilleur compromis entre eux lorsqu'on parle de l'évaluation de la performance globale (et non la qualité intrinsèque), comme une approche à part qui regroupe certains outils ou méthodes. Cependant ces co-évaluations peuvent devenir rapidement lourdes par la quantité de données d'entrée relatives aux multiples critères de la performance : coût, capabilité, risque, incertitude d'inspection…

Ainsi bien que la maîtrise de variations (variation risk management) soit souvent considérée comme une méthodologie (Thornton 2003), la philosophie de celle-ci peut s'inscrire dans la vision de chacune des approches illustrées en Figure 17. Lorsqu'un outil de maîtrise de qualité comme TAFT est appliqué au sein d'une entreprise, l'analyse technique du fonctionnement n'est efficace que si l'expert a une vision de l'ensemble de l'environnement fonctionnel du composant. Cette même vision soutient les outils de l'évaluation de performance puisque l'évolution de celle-ci à un niveau donné impacte (est impactée) sans doute la (par la) performance à d'autres niveaux du système. L'évolution de la performance est en effet due à la variation d'une ou d'un ensemble de caractéristiques. La variation et ses impacts dans tout le système doivent être suivis pour une vision globale et une meilleure prise de décision, quel que soit l'outil ou la méthode utilisés. Nous avons alors retenu la maîtrise de variations comme une approche factuelle et rigoureuse puisqu'elle propose un regard bien structuré pour l'ensemble de la démarche de planification du plan d'inspection. À savoir que le choix des outils et méthodes permettant l'exploitation des variations et leurs causalités dépend de la précision attendue.

Les outils et méthodes catégorisés par la vue globale sont détaillés dans la section suivante. La majorité des outils ont été appliqués sur un cas d'étude industriel présenté ci-dessous. Cela rend avant tout la comparaison des outils, plus révélatrice (significative) et apporte plus de clarté.

3. Détails des approches, méthodes, et outils de la littérature

Afin d'évaluer la pertinence des outils et d'identifier les manques ou les points bloquants de chacun, nous les avons appliqués sur un cas industriel simplifié. Il se porte

sur la pièce *« Couvercle d'Arbre Intermédiaire (C.A.I.) »*, composant du moteur type F8Q (Figure 18) de Renault et Volvo (Certa 2014). Cette pièce permet le passage du pignon intermédiaire et empêche le passage de fluide et de lubrifiant. La Figure 18 représente la ligne d'arbre C.A.I. qui se positionne sur le corps de pompe. Le déploiement des différents outils a été effectué à partir des dessins de définition de la pièce, la gamme d'usinage (Voir Annexe I), etc. comme le positionnement des travaux l'indiquait en chapitre 1.

Le déploiement repose sur deux hypothèses : les spécifications fonctionnelles sont définies selon le bureau d'étude et doivent être respectées afin d'assurer le fonctionnement du système. Ainsi le plan de définition de fabrication traduit ces dernières en spécifications de fabrication et la gamme détaillée du processus d'usinage qui intègre les opérations et les ressources pour obtenir les spécifications demandées.

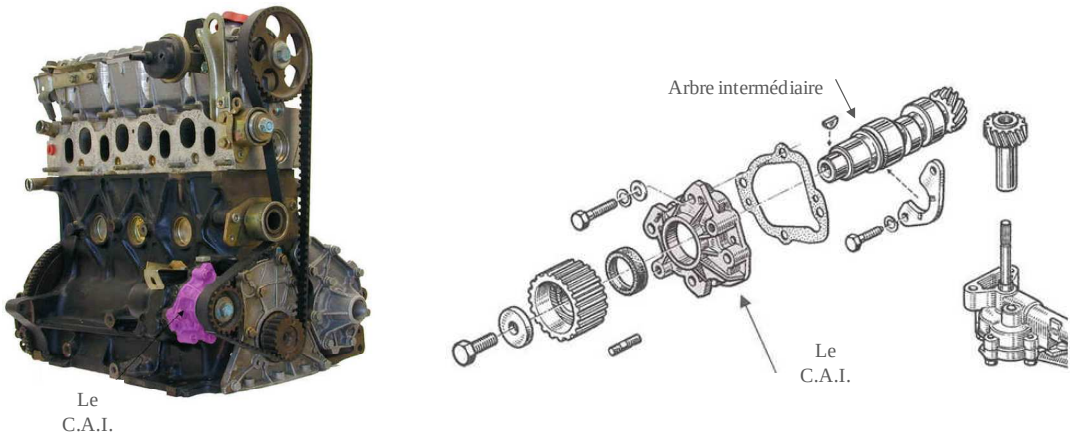


Figure 18. Vue d'ensemble du moteur F8Q et ligne d'arbre C.A.I. (Positionnée sur la pompe)

Les fonctions de la C.A.I. les plus fondamentales sont donc *« se positionner sur le corps »*, *« guider l'arbre par rapport au corps »* et *« empêcher le passage d'un fluide »*. Ainsi les spécifications fonctionnelles importantes sont *« la planéité de PL100 »*, *« la circularité de CY105 »* et *« la perpendicularité de l'axe de CY105 et PL100 »* (Figure 19).

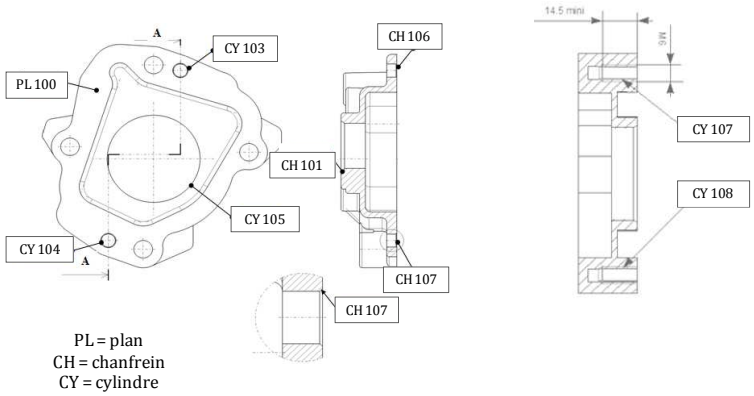


Figure 19. Les entités de la pièce à usiner

L'application de tous les outils et méthodes revus dans ce chapitre sur le même exemple, facilite la comparaison de ceux-ci. Pour la suite nous avons structuré la

présentation de chaque outil de la manière suivante : l'historique, la finalité, le déploiement et l'illustration, ainsi que l'analyse selon les exigences de l'état de l'art.

3.1. T.A.F.T.

Le TAFT (Tableau d'Analyse Fonctionnelle Technique) est une interprétation française de méthodes américaines d'analyse de la valeur, développé par Renault dans les années 90. Il a été enrichi par l'APTE (Charpentier & Mathieu 2005) pour l'analyse fonctionnelle et l'analyse de la valeur. Il a pour objectif de capitaliser la démarche de l'analyse fonctionnelle technique de chaque composant du mécanisme en cataloguant l'ensemble des fonctions techniques élémentaires réalisées par celui-ci et en structurant toutes les conséquences en terme de défaillance et les causes en terme de spécifications. C'est ainsi qu'il répond à des fins de traçabilité (Etienne 2007). La mise en œuvre du TAFT s'effectue durant la réalisation de la démarche d'analyse fonctionnelle technique en phase de conception détaillée. Un exemple de ce type de tableau est présenté en Tableau 1.

Tableau 1. Extrait d'un TAFT

	1				2				3		4			5		6		
	CAI				Liaisons - Surfaces				Sollicitations		Critères d'acceptation			Risque		Spécifications des surfaces		
No.	Agit	sur quoi	Complément	Remarques	Surf.1	Surf.2	Surf.3	GF	Quoi	Combien	CAE - CFG	Combien	Comment	Mode de Défaillance	Classe de gravité	Quoi	Combien	HCP
1	Se positionne	sur le corps de pompe	radial et axial		PL100	CY103 et CY104			Déplacement	0	Déplacement	0,1mm	Décollement	arbre trop long,...	2	Planéité de PL100, la rugosité PL100, localisation de CY103 et CY104, perpendicularité de	2	
2	Guide	l'arbre	radial		CY105	PL100			Jeux	> 0	Jeux	> 0, < 0,1mm	Trop Jeux	Le rapport entre la taille de l'arbre et la taille de CY105 est très grand, vibration de l'arbre	3	circularité de CY105,perpendicularité de l'axe de CY105 et PL100, rugosité de CY105	3	
3	Se positionne	sur les deux goupilles	radial		CY103 et CY104				Déplacement	0	Déplacement	0,1mm	Décollement	arbre trop long,...	3	Localisation de CY103 et CY104, la perpendicularité de l'axe de CY103, CY104	3	
4	Laisse passer	les cylindres des vis	radial		CY107 et CY108				Jeux	> 0	Jeux	> 0, < 0,1mm	Trop Jeux	Le rapport entre la taille de le vis et la taille de CY107, CY108 est très grand, montage difficile, pas de positionnement entre le CAI et le	2	La rugosité de CY107 et CY108, la circularité de CY107 et CY108 et la perpendicularité de l'axe de vis, CY107 et CY108, la localisation de CY107 et CY108	2	
5	Positionne	la tête de vis	axial		PL100				Déplacement	0	Déplacement	0,1mm	Décollement	vis trop longue, mauvais montage des vis	2	La rugosité de PL100, la planéité de PL100, la perpendicularité de l'axe de vis, CY107 et CY108	2	
6	Empêche le passage	un fluide	entre CAI et le corps de pompe		PL100				Flux	0	Fuite	> 0,001cc	Fuite	effet d'usure dans le plan PL100, risque du fuite, non hermétique, étanchéité	3	La planéité de PL100 et la rugosité de PL100	3	
7	Empêche le passage	un fluide	entre CAI et l'arbre		CY105				Flux	0	Fuite	> 0,001cc	Fuite	effet d'usure dans le cylindre CY105, risque de fuite, non hermétique, étanchéité	2	La circularité de CY105, rugosité de CY105	2	
8	Résiste	a lui-même	la pression du fluide		PL100	CY105			Pression	P	Pression	< P max	Pression	Risque de fuite, traces d'usure ou fissure	2	La planéité de PL100, La circularité de CY105, la rugosité PL100 , perpendicularité de l'axe de CY105 et PL100	2	

La mise en œuvre de cet outil est détaillée par (Charpentier & Mathieu 2005). Elle se décompose en six étapes majeures consécutives qui permettent aux concepteurs de structurer leurs connaissances sous forme d'un tableau qui facilite la traçabilité des composants, leurs conséquences et causes. Les experts doivent connaître l'ensemble du produit et ses composants et les fonctions majeures, et être capable d'identifier les conditions d'aptitude à l'emploi et les conditions fonctionnelles géométriques des surfaces engagées dans les liaisons. L'objectif est de faire apparaitre les spécifications micro ou macro des composants à satisfaire, les modes de défaillance, et leurs classes de gravité pour garantir chaque FTE par les étapes suivantes :

1. Description des FTEs du composant : les fonctions techniques élémentaires intrinsèques à la pièce ou liées à son comportement dans son environnement doivent être identifiées.
2. Description des entités géométriques du composant réalisant la FTE : les surfaces et liaisons engagées pour la satisfaction des FTE sont identifiées pour se rapprocher d'une vision orientée plus vers les spécifications géométriques que fonctionnelles.
3. Caractérisation de la FTE par des grandeurs physiques : les actions physiques que subit la pièce continuellement, leurs valeurs ou leurs grandeurs sont à décrire.
4. Description des critères d'acceptation : les grandeurs physiques, leurs cibles ou limites, et la façon dont ils sont mesurés, sont exprimés. Ils permettent de vérifier s'ils satisfont les FTE à travers les exigences.
5. Caractérisation de non-conformité : les modes de défaillance éventuels liés aux FTE, et la gravité de leurs non-conformités sont décrits.
6. Description des spécifications géométriques nécessaires pour satisfaire les FTEs : les spécifications géométriques associées aux surfaces identifiées auparavant sont exprimées. La réalisation de ces dernières contribue à la conformité des conditions d'aptitude à l'emploi ou bien à ce que chaque FTE soit « correctement assurée ».

En conclusion, le TAFT est structuré de façon à ce que le raisonnement, à partir de la réalisation de la chaîne de côtes jusqu'à la fonctionnalité du composant, soit facile à tracer. Cet outil prend en compte le critère de satisfaction du client en traitant la fonctionnalité des composants. En ce qui concerne l'analyse multi-niveaux, le TAFT couplée avec le schéma de flux ou bloc diagramme dans une démarche de l'analyse fonctionnelle, permet de parcourir les fonctions et spécifications en détail au niveau du produit et de la pièce.

3.2. AMDEC

L'AMDEC ou FMEA/FMCEA (Arnzen 1967) (Failure Mode and Effects Analysis) est une méthode associée à une grille comme outil de mise en œuvre, inventée dans l'industrie aéronautique américaine dans les années 60. Le but est d'évaluer la conception du système, d'améliorer la fiabilité et de prévoir les défaillances potentielles d'un produit ou d'un processus de fabrication. Cette approche repose sur l'analyse du produit afin d'identifier ses composants, ses modes de défaillance, les causes de défaillance et leurs effets. Dans un esprit d'amélioration de la qualité, une analyse qualitative de fonctionnement du système s'impose avant de quantifier de façon subjective la criticité liée à chaque effet due à sa difficulté de détection (D) et sa gravité (G) ainsi qu'à la fréquence d'apparition de défaillance (F) au niveau des causes. Pour se faire, les experts effectuent la cotation (usuellement entre 1 et 10) des trois facteurs. L'AMDEC traditionnel permet ainsi de classer les types de défaillances potentielles, d'éliminer ou de réduire le risque de survenue de ces défaillances par la proposition d'actions correctives.

Selon le domaine d'application, il existe trois types principaux du FMEA/FMCEA :

- FMEA/FMCEA produit : recherche des modes de défaillances du produit engendrées par sa conception.
- FMEA/FMCEA processus : recherche des modes de défaillances du produit engendrées par son processus de fabrication.

- FMEA/FMCEA moyen de production (ressource) : rechercher des modes de défaillances des fonctions du moyen de production et de ses composants.

Le Tableau 2 et Tableau 3 présentent un exemple d'AMDEC au niveau du produit et celui du processus. Les colonnes sont numérotées dans l'ordre de leur remplissage. Le déploiement des tableaux d'AMDEC est détaillé ci-dessous dans le même ordre d'exécution :

1. Description des FTEs du composant ou des opérations de fabrication du composant : les fonctions liées au produit, au niveau de l'assemblage (la fonctionnalité du système, la condition de montage ...), les fonctions techniques élémentaires des pièces (dérivées de l'analyse fonctionnelle) ou inhérentes à la fonction d'assemblage (comportement pièce-pièce) au niveau de l'AMDEC Produit, et les opérations de fabrication au niveau de l'AMDEC Pièce sont identifiées dans un premier temps. Ces caractéristiques, quel que soit le niveau, sont potentiellement sujettes à défaillance et donc à la hiérarchisation des risques associés. Naturellement, pour chaque composant et chaque gamme de fabrication, un tableau d'AMDEC doit être traité.
2. Description des causes potentielles de la non-conformité du produit et des dérives du processus : les spécifications des composants du produit et les paramètres de processus de fabrication doivent être identifiés pour répondre à la question suivante « Comment les fonctions/le processus sont-ils assurés ? ». Il peut y avoir plusieurs causes pour une seule fonction ou opération.
3. Caractérisation des modes de dysfonctionnement : les éventuels modes de défaillance, la manière dont le système pourrait être amené à ne pas fonctionner, sont à identifier, à savoir que généralement plusieurs modes de dysfonctionnement sont identifiables pour chaque fonction ou opération.
4. Description des modes/moyens de détection : les activités de détection d'anomalie apparue au niveau des causes et des modes de défaillance sont décrites.

Tableau 2. Extrait d'un AMDEC Produit

	1	6	5	3	2	4					
Nb.	**Fontion et/ou Processus**	**Effet**		**Mode dysfonction**	**Cause**	**Détection**	**F (cause)**	**D (detedtion)**	**G (effect)**	**FDG**	**Agir**
		Conséquences Client	**Fonction perturbée**								
1	Se positionne sur le corps de pompe	Dysfonctionnement de la pompe.	Dysfonctionnement de la distribution en huile du moteur.	Mauvais Positionnement.	Planéité de PL100.	Activité de contrôle de la planéité. Activité de contrôle des performances de la pompe. Activité de contrôle d'usinage.					
					Rugosité de PL100						
					Localisation de CY103 et CY104						
					Perpendicularitéde l'axe de CY103, CY104 et PL100						
2	Guide l'arbre	Dysfonctionnement de la pompe. Emission de bruit	Mouvement incorrect	Impact entre l'arbre et le carter Frottement important	Circularité de CY105	Activité de contrôle de circularité de G45					
					Trop de jeu entre l'arbre et le carter						
3	Laisse passer les cylindres des vis	Dysfonctionnement de la pompe	Mouvement relatif entre le CAI et le corp de la pompe	Mauvais positionnement. Pas de fixennement Jue Entrée erronnée	Circularité de CY107 et CY108	Activité de contrôle de la circularité Mesurer les trous					
					Diamètre des trous CY107 et CY108						
4	Positionne la tête de vis	Mauvaise fixennement	Mauvaise fixation	Mauvais positionnement. Pas de fixation Jeu	La rugosite dePL100	Activité de contrôle de la planéité. Activité de contrôle d'usinage.					
					La circularité de CY107 et CY108						
					Planéité de PL100.						
5	Empêche le passage d'un fluide entre CAI et le corps de pompe	Dysfonctionnement de la pompe	mauvaise performance	Fuite.	Planéité de PL100.	Activité de contrôle de la planéité.					

5. Description des effets des fonctions et/ou processus perturbés : les fonctionnements attendus qui pourraient être perturbés par des défaillances ou dérives survenues sont identifiés. Leurs conséquences sont également traduites aux yeux du client. Pour cela, il faudra répondre à une question « En quoi est-elle une contribution importante aux fonctions/opérations ? ». Pour les concepteurs, il s'agit d'exprimer non seulement la fonction technique perturbée mais également la conséquence vue par le client en cas de défaillance.
6. Evaluation de la criticité de fonction et/ou processus : l'ensemble des facteurs de risque qui contribuent à l'évaluation de la criticité doivent être estimés par l'expert ; la fréquence d'apparition des défaillances pour des causes données, la difficulté de détection, et la gravité de l'effet supposé apparu. L'évaluation de la criticité des défaillances potentielles (Risk Priority Number) se fait par la suite par le produit des trois facteurs de risque estimés par une notation subjective souvent sur une échelle ordinale. Cela permet la priorisation des risques et donc une prise de décision à savoir sur quel mode de défaillance on doit agir.

Tableau 3. Extrait d'un AMDEC Processus

AMDEC: Processus du Carter											
	1	6	5	3	2	4					
Nb.	Fontion et/ou Processus	Effet		Mode dysfonction	Cause	Détection	F (cause)	D (detedtion)	G (effect)	FDG	Agir
		Conséquences Client	Fonction perturbée								
1	Usinage de PL100	Dysfonctionnement de la pompe. Fuite d'huile.	Mauvais positionnement du carter.	Un brut de fonderie défectueux. Défaut de mise en position de la piéce.	Vitesse de coupe	Activité de contrôle visuel de brut de fonderie. Modification du montage d'usinage.					
					Avance radiale						
2	Percer CY103 et CY104	Pas de fixation. Fuite d'huile.	Mauvais positionnement des goupilles	Un brut de fonderie défectueux. Défaut de mise en position de la piéce. Outil n'est pas adéquat	Vitesse de coupe	Activité de contrôle visuel de brut de fonderie. Modification du montage d'usinage. contrôle de la carte de visite					
					Avance radiale						
					Avance axiale						
3	Chanfreiner CH106 et CH107	Pas de fixation. Fuite d'huile.	Mauvais positionnement des goupilles	Défaut de mise en position de la piéce. Outil n'est pas adéquat	Vitesse de coupe	Modification du montage d'usinage. contrôle de la carte de visite					
					Avance radiale						
4	Surfacer PL100	Dysfonctionnement de la pompe. Fuite d'huile.	Mauvais positionnement du protection. Mauvais positionnement du carter.	Défaut de mise en position de la piéce. Outil n'est pas adéquat	Vitesse de coupe	Modification du montage d'usinage. contrôle de la carte de visite					
					Avance radiale						
5	Contournage CY105	Dysfonctionnement de la pompe.	Pas de guidage de l'arbre	Localisation de CY103 et CY104 Circularité de CY103 et CY104 Perpendicularité de l'axe de CY103, CY104 et PL100	Un brut de fonderie défectueux. Défaut de mise en position de la piéce. Outil n'est pas adéquat	Activité de contrôle visuel de brut de fonderie. Modification du montage d'usinage. contrôle de la carte de visite					

En conclusion, l'outil AMDEC offre une flexibilité d'application aux entreprises ayant un principe facilement interprétable. Il est usuellement utilisé en phase d'amélioration de la qualité du produit et de son processus de fabrication et peut être intégré dès les phases préliminaires de conception. Cet outil a pour but de mettre en place des actions correctives lors d'apparition de défaillances afin de réduire les risques dans un système donné et contribue ainsi à la satisfaction du client. En même temps il tient compte non seulement de la performance des modes de détection mais aussi de l'aptitude du processus de fabrication à réaliser des caractéristiques et donc des exigences fonctionnelles, par le facteur de risque de la fréquence directement liée à la capabilité du processus. Mis à part cette analyse multicritères, la structure d'AMDEC et ces multiples

tableaux facilitent l'analyse multi-niveaux, produit, pièce, processus et ressource. Cet avantage de fournir une vision globale sur tous les niveaux n'est pas négligeable. Cependant les relations causales ne sont que partiellement prises en compte au sein d'un seul tableau (niveau) d'AMDEC mais pas entre eux. C'est à dire qu'à chaque niveau, le traitement de chaque défaillance se fait indépendamment de ce qui a été (ou sera) exprimé au sein d'autres niveaux d'AMDEC. L'utilisation très répandue de cet outil dans de nombreux secteurs industriels démontrent de même sa facilité de mise en œuvre. Néanmoins, il est généralement difficile d'être précis sur la note finale de la criticité issue de ce type de propagation de risque (multiplication). La prise de décision finale s'avère être subjective. Son adaptabilité malgré ses points manquants a mené à la proposition de multiples approches pour surmonter les limites de l'outil classique (Liu et al. 2013). Les améliorations proposées par la littérature sont notamment axées sur la robustesse de la prise de décision issue d'AMDEC ou bien sur le couplage de l'outil AMDEC avec d'autres pour le valider. Certaines de ces approches seront détaillées ultérieurement lors du choix de l'outil intégrant la démarche de la conception de plan d'inspection en chapitre IV.

3.3. QFD

Le QFD (Quality Function Deployment) est une méthode développée au Japon dans les années 60 et concrétisée par (Akao 1997). Il cite la croissance rapide de l'industrie automobile japonaise et leurs nouvelles unités de développement de produits comme le moteur de développement de QFD. Le contrôle de la qualité finale (QC) suite à la fabrication n'était plus suffisant. La nécessité de « design quality » a été reconnue. L'approche a ensuite été modifiée en 1972 dans les chantiers navals afin de traduire systématiquement les besoins du client en fonctions techniques et caractéristiques. Le premier livre sur le sujet, Quality Function Deployment par Akao et Mizuno, a été publié par JUSE Press en 1978 (Mizuno & Akao 1978). Le but de cette méthode est de traduire et de structurer de façon appropriée les attentes du client en spécifications du produit et de son processus. Le déploiement de QFD est récapitulé dans les points suivants :

1. Description et priorisation des besoins du client (QUOI) : les experts répondent à la question suivante « Quelles sont les attentes clients à considérer en priorité pour assurer la qualité ? » par les techniques de classement et des comparaisons par paires pour établir les priorités.
2. Évaluation des produits de la génération précédente à l'égard des produits compétitifs (POURQUOI) : les points forts et faibles actuels sont mis en question par rapport à la concurrence. Les experts doivent répondre à la question suivante « Comment les forces et les faiblesses du produit compétitif répondent aux priorités des clients ? »
3. Description des fonctions techniques (COMMENT) et leurs apports selon les besoins attendus : l'ensemble des caractéristiques techniques qui satisfait les besoins du client et leurs niveaux de corrélations sont identifiés. Les caractéristiques doivent être significatives et mesurables. En fonction de l'importance des relations et des coefficients des relations une question se pose « Quelles sont les exigences techniques à privilégier ? ».
4. Description des critères d'évaluation des exigences techniques : les valeurs cibles des caractéristiques techniques sont identifiées.

5. Détermination des interactions potentielles entre les exigences : les dépendances et les conflits entre les exigences techniques, positives ou négatives, sont identifiées. Les interactions positives peuvent renforcer la qualité finale alors que les interactions négatives suggèrent un compromis dans la satisfaction des valeurs cibles.
6. Quantification des exigences du produit : l'importance ou la difficulté d'accomplissement des caractéristiques techniques est évaluée.

En résumé la matrice QFD permet à la fois de définir les spécifications d'un produit (le COMMENT) à partir des attentes du client (le QUOI), de comparer le produit avec ses produits concurrents et de faire apparaître la solution optimale à mettre en place par l'entreprise. La partie matricielle QUOI vs COMMENT permet de quantifier la satisfaction qu'apporte une solution COMMENT pour répondre à une attente QUOI. Généralement les évaluations dans le cadre de QFD sont subjectives et utilisent une échelle 1- 5-9 (ou 1-3-9) pour noter les relations faibles, modérées et fortes. La Figure 20 représente l'outil graphique avec des zones numérotées selon les étapes de déploiement ci-dessus.

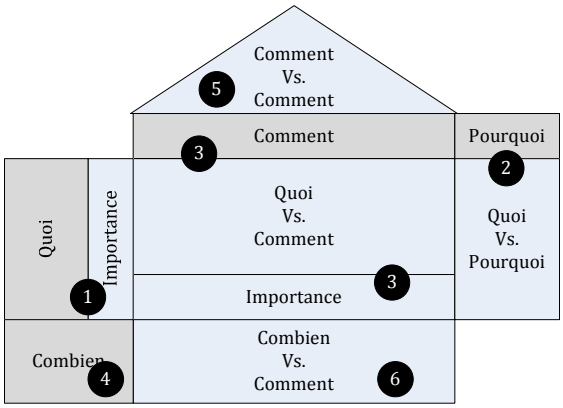


Figure 20. La matrice de QFD ou la maison de la qualité (Tollenaere 1998)

À savoir que cinq matrices en cascade (Figure 21) sont aptes à tracer les caractéristiques à partir des besoins du client jusqu'aux paramètres du processus [Hassan 2010] :

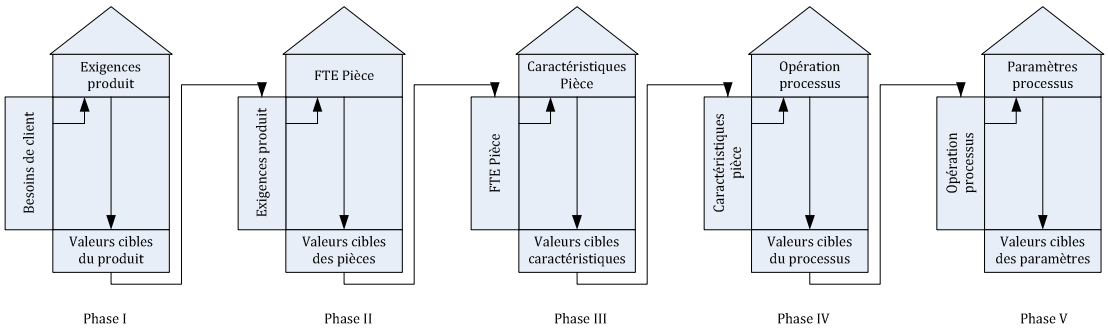


Figure 21. Cinq phases de QFD en cascade

- Les besoins du client vs. les exigences du produit (QFD I)
- Les fonctions (exigences) du produit vs. les FTE des composants du produit (QFD II)

- Les FTE des composants vs. les spécifications des composants (QFD III)
- Les spécifications vs. les opérations du processus (QFD IV)
- Les opérations du processus vs. les paramètres du processus (QFD V)

Dans le contexte de la planification d'inspection, l'identification des exigences se résume en une question « quoi contrôler ? ». Nous avons limité l'application de cet outil sur l'exemple à une partie restreinte mais essentielle de la maison de la qualité présentée brièvement en Figure 22, pour la phase III, et en Figure 23, pour la phase IV.

La pompe hydraulique, notamment le couvercle du corps de la pompe, fait également l'objet d'application de QFD. Contrairement à d'autres exemples d'application de ce chapitre sans aucune modification de l'outil original, nous avons proposé une étape intermédiaire supplémentaire à QFD. Cette étape qui semble nécessaire est donc détaillée à travers le cas d'applications.

En appliquant le QFD III, nous passons en effet des fonctions techniques élémentaires identifiées aux caractéristiques de la pièce, du **point de vue fonctionnel** (Figure 22). Prenons les fonctions fondamentales de la pièce comme *« se positionner sur le corps de pompe »*, *« guider l'arbre par rapport au corps de pompe »*, et *« empêcher le passage d'un fluide »*. Cela nous amène aux pertinences des caractéristiques de la pièce dont *« la planéité de PL100 »*, *« la circularité de CY105 », et « la perpendicularité de l'axe de CY105 et PL100 »* (Figure 19) (Voir Annexe I).

		Caractéristiques de la pièce (point de vue fonctionnel) (caractéristiques du produit)													
Fonctions Techniques Elémentaires	Poids de fonction	Planéité de PL100	Rugosité de PL100	Circularité de CY105	Localisation de CY105	Perpendicularité de l'axe de CY105 et PL100	Rugosité de CY105	Localisation de CY 103 et CY104	Perpendicularité de l'axe de CY103, CY104 et PL100	7	8	9	10	12	13
Se positionne sur le corps de pompe	0,1	9	9					3	1						
Guide l'arbre	0,1			9		3	1								
Se position sur les deux goupilles	0,03							9	3						3
Laisse passer les cylindres des vis	0,03									3					
Positionne la tête de vis	0,03									3					
Empêche le passage d'un fluide entre CAI et le corps de pompe	0,1	9	3												
Empêche le passage d'un fluide entre CAI et l'arbre	0,1			3		3	9								
Résiste à la pression du fluide	0,04									8	8				
Résiste aux actions mécaniques dues a l'arbre	0,08			9	9		7								
Transmet un fluide du corps de pompe vers la chambre de la pièce	0,08										9	9			
Est maintenu en position par les vis sur le corps de pompe	0,04							9	3						
Guide l'arbre par rapport au corps de pompe	0,2			9	3	9									
Positionne la protection	0,03												9		
Montabilité / Démontrabilité de la pièce CAI sur le corps de pompe	0,02														9
Montabilité / Démontrabilité de l'arbre sur la pièce CAI	0,02													9	
Pertinence des caractéristiques de la pièce	Brute	1,8	1,2	3,72	1,32	2,4	1,56	0,93	0,31	0,5	1,04	0,72	0,27	0,18	0,27
	Relatif	0,11	0,07	0,23	0,08	0,15	0,10	0,06	0,02	0,03	0,06	0,04	0,02	0,01	0,02

Figure 22. QFD III appliqué sur l'exemple C.A.I.

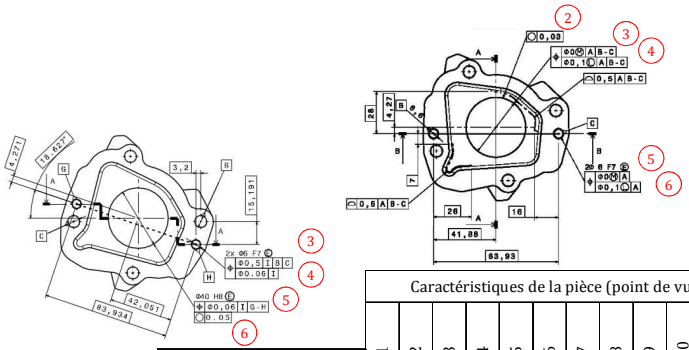
QFD IV (QFD processus) classique relie qualitativement les caractéristiques de la pièce aux éléments du processus (opérations) mais ne détaille pas jusqu'au niveau des paramètres du processus de fabrication. Cependant comme chacune des opérations est pilotée par plusieurs paramètres et que le but est d'avoir les paramètres mesurables du processus, nous pensons à décomposer chaque élément en en ses paramètres mesurables

comme l'opération de « Surfacer PL100 ébauche » qui est associée aux « Vitesse de coupe », « Perpendicularité de l'axe d'outil et PL100 », etc. (Figure 23). Contrairement à ce cas d'étude avec très peu d'opérations, le déploiement des caractéristiques détaillées par le QFD peut rapidement devenir lourd et ingérable.

		Les éléments du processus																																					
		Surfacer PL100 ébauche				Percer CY103, CY104				Chanfreiner CH101, CH102		Surfacer PL100 finition				Contournage CY105 ébauche				Contournage en tirant CH106		Aléser CY103, CY104 finition				Aléser CY105 finition				Taraudage CY107, CY108							
Caractéristiques de la pièce (point de vue fabrication)	Poids	Précision	Vitesse de coupe	Perpendicularité	Rugosité	Précision	Vitesse de coupe	Déformation	Perpendicularité	Précision	Perpendicularité	Précision	Vitesse de coupe	Perpendicularité	Rugosité	Précision	Vitesse de coupe	Vitesse d'avance	Perpendicularité	Précision	Perpendicularité	Précision	Vitesse de coupe	Déformation	Perpendicularité	Précision	Vitesse de coupe	Vitesse d'avance	Perpendicularité	Vitesse de coupe	Déformation							
Planéité de PL100	0,2	9										3																											
Localisation de PL100	0,07	9										1																											
Rugosité de PL100	0,07	1										9																											
Circularité de CY105	0,2															9										3													
Localisation de CY105	0,12															9										1													
Rugosité de CY105	0,07															1										9													
Localisation de CY103 et CY104	0,11	1				9																3																	
M6	0,06																																					9	
4	0,05					1				9												1																	
8	0,05																			9																			
Le poids des éléments du processus		2,61				1,04				0,45		1,3				2,95				0,45		0,38				1,35				0,54									
		0,24				0,09				0,04		0,12				0,27				0,04		0,03				0,12				0,05									
Paramètres du processus		Précision	Vitesse de coupe	Perpendicularité	Rugosité	Précision	Vitesse de coupe	Déformation	Perpendicularité	Précision	Perpendicularité	Précision	Vitesse de coupe	Perpendicularité	Rugosité	Précision	Vitesse de coupe	Vitesse d'avance	Perpendicularité	Précision	Perpendicularité	Précision	Vitesse de coupe	Déformation	Perpendicularité	Précision	Vitesse de coupe	Vitesse d'avance	Perpendicularité	Vitesse de coupe	Déformation							
Pertinence du paramètre	Brute	0,4	0,3	0,3	0,15	0,3	0,2	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,5	0,5	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,4	0,6							
	Relatif	0,1	0,1	0,1	0,04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							

Figure 23. QFD IV appliqué sur l'exemple C.A.I.

Mis à part ce fait, comme il est présenté en QFD IV, l'identification des éléments du processus n'est légitime que si cela se fait à partir des caractéristiques de la pièce établies d'un **point de vue fabrication** (et non fonctionnel). Il est donc conseillé de traduire les spécifications fonctionnelles en celles du point de vue fabrication pour le passage de QFD III à QFD IV. Compte tenu des plans fonctionnels et de fabrication, ces deux dernières ne sont pas forcément toujours similaires. Nous avons donc proposé une étape liant le QFD III et le QFD IV. Elle décrit les relations causales mais d'une manière qualitative et même parfois subjective (Figure 24) (Voir Annexe I).



	Caractéristiques de la pièce (point de vue fonctionnel)													
Caractéristiques de la pièce (point de vue fabrication)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	*													
2	*							*	*					
3					*	*	*							
4					*	*								
5			*	*										
6		*												
7												*		
8											*			
9														*
10													*	
M6										*				

Figure 24. Etape liant les spécifications fonctionnelles et de fabrications proposées

En conclusion, l'outil QFD offre une structure par laquelle une grille d'importance des fonctions, des spécifications et des paramètres de processus est livrée. Pour cela, l'expert doit posséder de la connaissance relative à la pertinence des fonctions aux yeux des clients, de la contribution des caractéristiques des composants à la fonctionnalité du produit, et l'aptitude du processus à réaliser les caractéristiques. Les experts peuvent également mettre en place un comparatif des solutions par rapport à la concurrence et tenir compte du coût des solutions d'une façon non-exhaustive. QFD permet donc une analyse multicritères (notamment orientée satisfaction du client) et multi-niveaux (produit-pièce-processus). L'avantage de QFD est sa méthodologie structurée de même qu'il peut être appliqué dans toutes les phases du développement de produit (Figure 21). Il est plutôt facile à mettre en œuvre mais demande une grande quantité d'informations et propose une prise de décision basée sur une notation subjective et une échelle allant de 1 à 9. Cependant, pour des exemples réels avec une plus grande quantité d'informations, les tableaux de QFD peuvent poser de sérieux problèmes de visibilité, de suivi, ou même de transmission des connaissances.

3.4. Matrice d'impact

La Matrice d'impact a été développée par (Pillet et al. 2007) et (Ozouf 2009) afin de hiérarchiser des caractéristiques élémentaires par rapport à leurs contributions sur l'ensemble des fonctions attendues. Elle est inspirée de QFD et AMDEC et couvre en partie leurs inconvénients. La Matrice d'impact est utilisée pour générer un plan de surveillance avec les contraintes de l'ingénierie simultanée. Cette approche qui n'est valable que pour des systèmes pas trop complexes comporte :

	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
	Note Qualité	Caractéristiques avals du produit pour le client ou pour l'assemblage	Se positionne sur le corps de pompe	Guide l'arbre	Guide l'arbre par rapport au corps de pompe	Empêche le passage d'un fluide entre CAI et le corps de pompe	Empêche le passage d'un fluide entre CAI et l'arbre	Résiste a la pression du fluide	Résiste aux actions mécaniques due a l'arbre	Transmet un fluide du corps de pompe vers la chambre de la pièce	Maintenu en position par les vis sur le corps de pompe	Positionne la protection	Montabilité / Démontrabilité de la pièce CAI sur le corps de pompe	Montabilité / Démontrabilité de l'arbre sur la pièce CAI	Se positionne sur les deux goupilles	Laisse passer les cylindres des vis	Positionne la tête de vis	Gravité brute	Gravité
	29,0%	Poids	9	10	10	9	9	7	8	7	6	6	8	5	4	4	3		
Pièces	Cible et Tolérances	Niveau de satisfaction è Caractéristiques élémentaires	36%	61%	77%	37%	49%	0%	0%	0%	56%	0%	0%	0%	56%	0%	0%	Hiérarchisation	
	0,08	1 / Planéité de PL100	100%		10%	100%												13,1	10,0
	0,03	2 / circularité de CY 105		100%	100%		10%				1							14,4	10,0
	(40.87) 0	3 / localisation (max de mat) de CY 105				70%												7,5	7,5
	(40.87) 0.1	4 / localisation (min de mat) de CY 105		70%		100%	70%											14,4	10,0

Figure 25. Première partie de Matrice d'impact permettant de déterminer les gravités associées à chaque caractéristique

1. Hiérarchisation des caractéristiques élémentaires des composants du système, en fonction de leur impact sur les fonctionnalités attendues par le client : après une analyse fonctionnelle technique afin d'évaluer l'importance des fonctions attendues, la contribution de chacune des caractéristiques pièces sur chaque fonction afin d'en déduire l'importance intrinsèque de chaque caractéristique est

calculée au regard de l'ensemble des fonctionnalités attendues par le client. L'impact d'une caractéristique produit (une cote par exemple) sur les fonctionnalités attendues du système n'est pas toujours a priori évident, notamment lorsque les équipes de conception sont conséquentes et où chaque concepteur n'a qu'une vision parcellaire du système. L'évaluation de la gravité de défaillance des caractéristiques est détaillée et argumentée par (Ozouf 2009) (Figure 25).

2. L'analyse de risque, type AMDEC Processus : l'occurrence de défaillance relative à chaque caractéristique du produit est déterminée, en partant de l'hypothèse que la meilleure façon de détecter une anomalie dépend du mode de défaillance processus qui la génère. Ainsi, avant tout une détermination de l'anomalie de la caractéristique s'impose ;
   - une défaillance erratique
   - une anomalie, produite par un processus stable (problème de sous capabilité par exemple)
   - …

   A partir de cela, la détermination des modes de défaillance processus est généralement rapide. A chaque mode de défaillance processus redouté, une pondération est affectée qui participe à l'estimation de l'occurrence (Ozouf 2009) (Tableau 4) ;

   Et enfin pour le calcul de l'occurrence, il est nécessaire de prendre en compte l'aptitude du processus au regard de la tolérance réalisée par celui-ci. Pour cela, un coefficient de difficulté de réalisation est attribué au processus en fonction de sa capabilité. L'occurrence calculée à partir de ces facteurs est ensuite graduée sur une échelle de 1 à 10. Une colonne est également dédiée aux « actions correctives » qui visent à diminuer la fréquence d'occurrence d'une dérive (Figure 26).

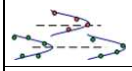
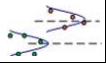
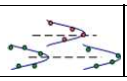
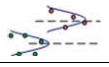
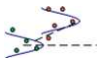
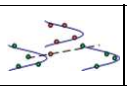
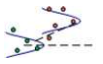
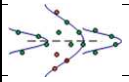
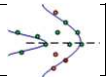
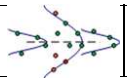
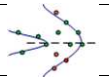
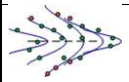
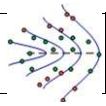
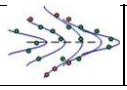
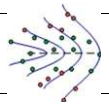
Tableau 4. Pondération relative affectée à chaque mode de défaillance processus

Mode de défaillance processus	Poids
Processus stable	1
Décalage (brutal ou en dérive) suite à événement causal prévisible	2
Décalage suite à événement causal imprévisible (comme une casse d'outil)	3
Défaillance erratique	4

3. La formalisation du plan de surveillance : la proposition du plan de surveillance doit satisfaire **le niveau de détection nécessaire**, calculé à partir de la Gravité et la Fréquence, par la détermination des méthodes de contrôle, la fréquence et le moyen de contrôle. Pour mieux orienter ce choix, un récapitulatif des différentes dérives est proposé afin d'identifier le type de surveillance le plus adapté a une situation de dérive (Tableau 5). La position des différentes détections est définie de telle sorte que **la note réelle de détection** soit la plus proche valeur inférieure de la note de détection nécessaire calculée, et ce pour chacune des caractéristiques.

4. Une estimation de la qualité globale du produit : pour évaluation de la satisfaction du client, le ratio de satisfaction de chacune des fonctionnalités est avant tout estimé en fonction de la note de capabilité de chacune des caractéristiques et la contribution de celles-ci sur la fonctionnalité. A partir de ce ratio, et de la note de gravité fonctionnelle attribuée à chaque fonctionnalité, est calculée une note de qualité globale.

Tableau 5. Définition du meilleur mode de détection en fonction du mode de défaillance du processus (Ozouf 2009)

Position	Brutale	 -Redémarrage machine (stabilisation)		 -Erreur outil -Changement consigne		 -Copeau collé sur butée quelque temps		 -Casse outil -Collision pièce
		-Contrôle 1ère pièce produite après événement causal		-Contrôle 1ère pièce produite après événement causal -Poka-Yoke		-Contrôle 100% (de caractéristique ou paramètre) -SPC mesure (moyenne), fréquence rapide		-Contrôle libératoire -SPC mesure (moyenne)
	Dérive	-Redémarrage machine (stabilisation)		 -Réglage machine au démarrage sans attendre sa stabilisation		 -Problème de régulation -Variation des conditions ambiantes		 -Usure outil -Encrassement filtr e -Déréglage machine
		-SPC mesure (moyenne) avec prélèvements rapprochés suite a événement causal		-SPC mesure (moyenne) avec prélèvements rapprochés suite a événement causal		-SPC mesure (moyenne), fréquence rapide		-SPC mesure (moyenne)
Dispersion	Brutale	 -Redémarrage machine (stabilisation)		 -Défaut de localisation suite à outil mal centré dans la broche		 -Mise en résonnance suite au démarrage d'une autre machine		 -Casse d'un guidage machine
		-Contrôle dispersion sur échantillon suite a événement causal		-Contrôle dispersion sur échantillon suite a événement causal		-SPC mesure (dispersion), fréquence rapide		-SPC mesure (dispersion)
	Dérive	 -Redémarrage machine (stabilisation)		 -Mauvais serrage outil après changement		 -Problème de régulation -Variation des conditions ambiantes		 -Usure d'un foret -Prise de jeux
		-SPC mesure (dispersion) avec prélèvements rapprochés suite a événement causal		-SPC mesure (dispersion) avec prélèvements rapprochés suite a événement causal		-SPC mesure (dispersion), fréquence rapide		-SPC mesure (dispersion)
Erratique		Sans objet		Sans objet		-Oubli/Erreur humaine -Pollution ponctuelle -Copeau collé -Contrôle 100% auto (de caractéristique ou paramètre) -SPC attributs ou contrôle selon ISO 02859-1		Sans objet
Redescente		Réversible		Irréversible		Réversible		Irréversible
Prévisible		Prévisible				Imprévisible		

	N°				0,5	1	3	3	2	4							Contextes de contrôle												
	Note Qualité	Caractéristiques avals du produit pour le client ou pour l'assemblage	Caractéristiques surveillées pour garantir la caractéristique sur la pièce (cote de fabrication)	Paramètres processus surveillés	Processus stable	Décalage en position redoutée (évènt identifié)	Décalage en position redoutée (n'importe quand)	Dérive en position redoutée	Dérive en dispersion redoutée	Cause erratique redoutée	Dans le cas d'un évènement causal redouté, préciser le type	Sévérité de la tolérance (1 tolérance très large à 3 tolérances très serrées)	Hiérarchisation des défaillances redoutées (Fréquence brute)	Fréquence (note de 1 à 10)	Actions pour diminuer la fréquence	Nouvelle fréquence	Détection nécessaire	Réglage	Feu Vert	Pilotage fréquentiel ou contrôle libératoire fréquentiel bord de ligne	Pilotage sur évènement bord de ligne		Contrôle libératoire fréquentiel hors ligne		Contrôle à 100%	Détection	Criticité
	29,0%	Poids																										
Pièces	Cible et Tolérances	Niveau de satisfaction è Caractéristiques élémentaires	Plan de surveillance		Défaillance redoutée							IT	F brut	F	Action corrective	F'	D'	Moyen	Moyen	Moyen	Taille et freq	Evène-ments	Moyen	Taille	Moyen	Taille et freq	Moyen	D	C
	0,08	1 / Planéité de PL100			1				1		Modification Processus	3	7,5	7,5		8	1							3		1/Jour		3	225
	0,03	2 / circularité de CY 105	COTES 28.5 80 8					1	1			3	15	10		10	1									1/Jour		1	100
	(40.87) 0	3 / localisation (max de mat) de CY 105						1			2	3	9	9		9	1				3/H			3		1/Jour	visuel	1	68
	(40.87) 0.1	4 / localisation (min de mat) de CY 105						1				2	6	6		6	2									1/Jour	visuel	7	420

Figure 26. Deuxième et troisième parties de Matrice d'impact permettant de déterminer l'occurrence de défaillance associée à chaque caractéristique, la difficulté de réalisation de caractéristique, et la positions des contrôles

La Matrice d'impact prend en considération le critère de la satisfaction du client par une grille d'importance des fonctions, et le niveau de sensibilité des fonctions par rapport aux caractéristiques. La réalisation des caractéristiques dépend elle-même de l'aptitude du

processus de fabrication fonction de la fréquence d'apparition de défaillance. Elle propose un plan de surveillance où la performance des modes de contrôle et même le critère de coût de contrôle (d'une manière implicite par le jugement porté par l'expert) sont pris en considération. De même, cette analyse multicritères est menée sur tout le système pour une analyse multi-niveaux. Le calcul de la note de la qualité finale se fait à partir de la satisfaction des fonctions au niveau du produit, des caractéristiques pièces, et de la performance du processus de fabrication et de contrôle. L'exhaustivité de cet outil et sa complémentarité vis-à-vis des attentes de la conception sont indiscutables. Cependant, la Matrice d'impact reste un outil qui n'est pas facile à mettre en place mais qui fournit un jugement plus crédible que celui de QFD et AMDEC.

3.5. Capabilité

L'ensemble des outils et des méthodes de la « Maîtrise statistique des procédés » (MSP), dont la carte de contrôle et l'étude des capabilités sont des outils, permet d'analyser les variabilités. Comme il a été discuté, la maîtrise des variabilités fait également l'objet de « la planification d'inspection » dans le cycle de conception du produit et de son processus de fabrication. Elle est développée dans le but de réduire les variabilités notamment au niveau des paramètres de processus impactant les caractéristiques géométriques (Abugov 1993) (Hossain et al. 1996) (Krumwiede & Sheu 1996).

La capabilité est un critère mesurable adimensionnel. Ce critère permet de quantifier l'aptitude d'un procédé ou processus, selon la conception de la pièce ou du produit à respecter les tolérances fixées par le cahier des charges. La capabilité permet un choix objectif du niveau de la qualité requis (ni trop capable ni pas assez). Les indicateurs de capabilité ont pour but de comparer la qualité d'une production sur une période donnée, par rapport à un objectif donné (Équation 1). Ce critère peut être aussi synonyme de défaillance de production et de fréquence de défaillance de production, … . Il existe dans la littérature de nombreux travaux portant sur la définition de l'indicateur de capabilité Cp, Cpk, Pp, Ppk, Cpi, Cpik, …

Équation 1. Définition générique de la capabilité

$$Capabilité = \frac{Performance\ souhaitée\ du\ produit}{Performance\ réelle\ du\ processus}$$

L'application peut être intégrée dans la validation des décisions aux étapes de la conception :

- L'allocation des tolérances lors de la conception du produit.
- La sélection de processus et ses ressources, l'évaluation des rapports de la performance attendue, définies par les tolérances, et la performance réalisable par le processus.
- L'élaboration du plan d'inspection et le choix de ses ressources.

Indépendamment des cas d'utilisation, les indicateurs généralisés traitent deux types de variabilité ; le décentrage et la dispersion (Figure 27).

- Le décentrage : l'écart entre la cible et la moyenne. Le paramètre δ caractérise le décalage.
- La dispersion : les variations de la caractéristique autour de sa moyenne. Le paramètre σ caractérise l'amplitude de celle-ci. Elle est définie par exemple par la variance ou l'écart type. L'indicateur de dispersion n'est applicable que si la spécification est bi-limite.

La dispersion peut être définie à court ou à long terme (Figure 28) :

- La dispersion à court terme : elle prend en compte la dispersion instantanée. Elle représente l'écart entre deux échantillonnages lors de la fabrication de lot ;
- La dispersion à long terme : elle prend en compte la dispersion globale. Elle représente l'intervalle total de fabrication d'un lot.

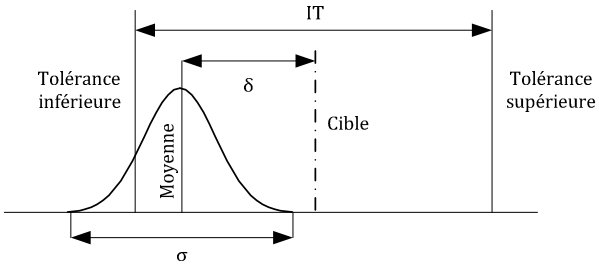


Figure 27. Paramètres de la variabilité

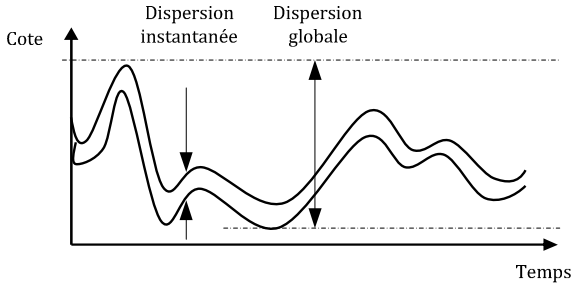


Figure 28. Dispersions instantanée et globale

Cet état de l'art se focalise sur trois catégories classiques d'indicateurs, qui utilisent la loi normale afin de modéliser l'aspect aléatoire des variations, axés sur a dispersion et le décentrage.

- Indicateur de mesure de la dispersion

Ces indicateurs prennent en compte la dispersion et considèrent la décentration, égale à zéro. Il est supposé que la dispersion suit une distribution normale avec un écart type σ. Il permet de vérifier si la dispersion est dans la plage de tolérance.

L'indicateur Cp peut être utilisé comme aide à la décision pour valider la capabilité d'un processus/ressources pour répondre aux spécifications requises à court terme. Cet indicateur désigne la ressource apte à exécuter un processus.

En revanche l'indicateur Pp est utilisé comme un indicateur de performance au niveau du produit ou celui de la pièce. L'indicateur Pp représente la qualité livrée au client à long terme. En général le procédé est capable, si l'intervalle de tolérance est plus grand que la dispersion aléatoire du processus avec une petite marge (Pillet 2005).

- Indicateur de mesure du décentrage

Ces indicateurs prennent en compte la dispersion et considèrent un décentrage non nul. Par hypothèse, la dispersion suit une distribution normale avec un écart type σ. Il s'agit d'un indicateur pour mesurer l'effet du décentrage (l'écart entre la cible et la moyenne) sur la performance à court terme ou de la dispersion globale (long terme).

L'indicateur Cpk vérifie si le processus/ressources n'est pas soumis à une dérive qui pourrait générer du rebut. Cet indicateur est utilisé pour définir le décentrage maximal que la fonction peut subir.

L'indicateur Ppk fournit aux clients une visibilité globale sur la qualité des pièces/produits livrés et sur la nécessité de surveillance régulière des moyens de production à long terme.

- Indicateur de mesure de la dispersion et le décentrage

Ces indicateurs prennent en compte la dispersion et le décentrage. Il est appliqué uniquement dans le cas où la spécification est bi-limite. L'objectif est de donner une image du processus à l'aide d'un indicateur unique, contrairement aux indicateurs de dispersions et décentrage listés. Cpm et Ppm sont définis respectivement à court terme et à long terme.

Avant une synthèse générale de la notion de capabilité, deux autres approches basées sur la capabilité sont détaillées : le tolérancement inertiel et l'approche hybride.

3.6. Le tolérancement inertiel et la capabilité inertielle

(Pillet 2005) a proposé un nouveau type de tolérancement. Il considère que le tolérancement statistique et le « pire des cas » sont des méthodes de tolérancement non seulement difficiles à mettre en œuvre mais aussi purement axées sur la qualité et peu crédible sur le plan économique. Cela est inspiré de la fonction de perte de Taguchi (Taguchi 1993) (Figure 29) et se base sur l'inertie (Figure 30) et non des intervalles de tolérance.

Équation 2. Définition de l'inertie

$$I_x = \sqrt{\delta_x^2 + \sigma_x^2}$$

Par le tolérancement, la caractéristique résultante est comparée à la caractéristique idéale par la cible. Lorsque la valeur de la caractéristique obtenue est placée sur la cible, le fonctionnement est optimal. Lorsque la valeur réelle s'écarte de la cible, l'opération sera de plus en plus sensible (Figure 30). (Taguchi 1993) a montré que la perte financière due à une déviation (offset) est proportionnelle au carré de la déviation de la cible.

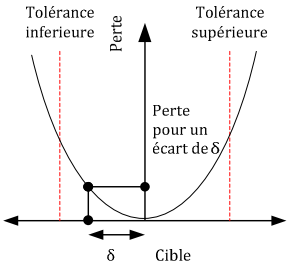


Figure 29. Fonction perte de Taguchi (Taguchi 1993)

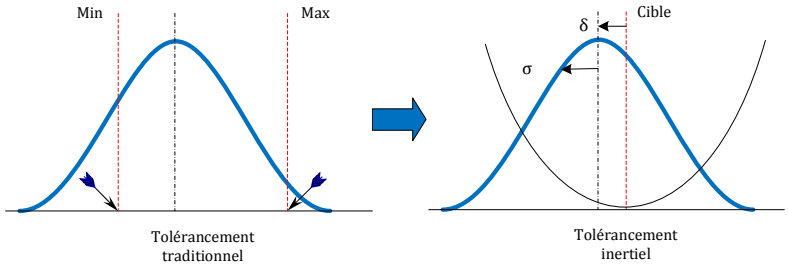


Figure 30. Tolérancement traditionnel Vs. Tolérancement inertiel [Pillet 2005]

Cet indicateur de capabilité inertielle prend en compte les variations au niveau du processus pour déterminer le résultat au niveau du produit et estimer la qualité fournie, certes, mais aussi considère l'écart de la valeur réelle et de la cible comme une source de dépense (perte) pour l'entreprise. Les critères de satisfaction du client, l'aptitude du processus et le coût sont donc répartis au niveau du produit et du processus.

3.7. Indicateur hybride

Il faut savoir qu'un indicateur de capabilité ne suffit pas parfois à lui tout seul ; l'interprétation des indicateurs de capabilité se fait par une comparaison de leurs valeurs. Ces indicateurs représentent soit le rendement entre la dispersion à court et long terme pour désigner un niveau de maîtrise du procédé soit la performance pour mesurer la perte de capabilité suite à un déréglage. Généralement indépendamment du cas d'application :

- Le rapport entre les capabilités Cp et Pp reflète l'instabilité du processus
- Le rapport entre les capabilités Pp et Ppk est dû à un déréglage non nul

L'étude de capabilité permet de prendre en compte le critère de satisfaction du client par la performance souhaitée et la variabilité du processus par la performance réalisable. Cette approche porte une analyse au niveau du processus et celui des caractéristiques des composants mais ne traite pas la fonctionnalité du produit dans son ensemble. La capabilité est facile à estimer et répandue, pour l'évaluation de performance du processus. Le Tableau 6 récapitule les définitions mathématiques des indicateurs revus par cet état de l'art. Le choix des indicateurs est très important mais ce qui peut être encore plus informatif qu'un seul indicateur de capabilité, est l'écart qu'il peut y avoir entre différents indicateurs.

Tableau 6. Récapitulatif des indicateurs de capabilité

Indice de qualité	Intérêt	Symboles
Capabilité court terme Capabilité du processus	Traduit la capabilité intrinsèque dans les conditions de la gamme	$\mathrm{Cp} = \frac{\mathrm{IT}}{6\sigma_{\text{court terme}}}$ $Cpi = \frac{I_{Max}}{I_{Observe\ court\ terme}}$ $Cpk = \frac{\min\{(TS - \bar{X}), (\bar{X} - TI)\}}{3\sigma_{Ct}}$ $Cpm = \frac{IT}{6\sqrt{\sigma_{Ct}^2 + (\bar{X} - cible)^2}} = \frac{Cp}{\sqrt{1 + 9(Cp - Cpk)^2}}$
Capabilité long terme Performance du processus	Traduit la qualité livrée	$Pp = \frac{IT}{6\sigma_{Long\ terme}}$ $Ppi = \frac{I_{Max}}{I_{Observe\ long\ terme}}$ $Ppk = \frac{\min\{(TS - \bar{X}), (\bar{X} - TI)\}}{3\sigma_{Lt}}$ $Ppm = \frac{IT}{6\sqrt{\sigma_{Lt}^2 + (\bar{X} - cible)^2}} = \frac{Pp}{\sqrt{1 + 9(Pp - Ppk)^2}}$
Hybride Rendements	Rendement de stabilité	$Rs\ \% = \frac{Pp}{Cp} \times 100$
Hybride Performance	Rendement de réglage	$Rr\ \% = \frac{Ppk}{Pp} \times 100$

Le Tableau 7 traduit ces écarts à titre d'exemple au regard des caractéristiques où les valeurs de σ_{Lt} et σ_{Ct} sont fixées :

- Les valeurs de capabilité sont très élevées. Il n'y a donc aucun problème.
- L'écart entre l'indicateur à court terme et long terme démontre la nécessité de stabiliser les variations qui augmentent au fil du temps. Une surveillance du processus par la carte de contrôle est conseillée.
- Initialement, la capabilité à court terme est insuffisante. Certaines interventions ou maintenances sont nécessaires. Nous ne pouvons probablement pas résoudre le problème à l'atelier.
- Il y a une grande différence entre Pp et Ppk due à un décentrage. Il est souvent facile de surmonter ce problème grâce à un meilleur contrôle des paramètres. Le suivi par la carte de contrôle est nécessaire.

Tableau 7. Les indicateurs de capabilité relative aux caractéristiques

Caracteristics	*Cp*	*Pp*	*Ppk*	*Ppm*
1. Ø 10 ± 0.05	2.5	2.2	1.9	1.63
2. Ø 12 ± 0.05	2.5	1.1	1.0	1.05
3. Ø 8 ± 0.02	1.1	0.9	0.8	0.86
4. L 20 ± 0.06	3.2	2.5	1.1	0.57

D'autres méthodes d'estimation de la performance globale existent : l'indicateur composite de capabilité du processus proposé par (Park & Kim 1998) (Chin et al. 2003) (Zheng & Chin 2004). CCP représente la capabilité globale des moyens de production. La complexité des produits, l'interdépendance et la multitude des caractéristiques de la qualité exigent l'évaluation simultanément de la qualité globale du processus. Autrement dit l'indicateur CCP reflète le niveau général de satisfaction de l'ensemble des caractéristiques de la qualité et estime la désirabilité du processus pour réaliser un produit multi-caractéristiques dans le temps.

Cette vision globale de la qualité peut s'appliquer aussi à d'autres critères de la prise de décision, notamment le coût. Le coût global engendré par une solution, ou par un ensemble de décisions est certes, indicatif mais pour un contexte multicritères n'est pas suffisant. Il convient plutôt de parler de « coût de la qualité ». Par la suite, nous nous intéressons aux modèles et méthodes d'estimation de coût, et plus particulièrement parmi eux à ceux qui s'inscrivent dans une approche d'évaluation conjointe de la performance.

3.8. Modèles et méthodes d'estimation des coûts (de la qualité, et du risque)

Nous considérons évidemment le coût comme un critère qui affecte la planification pour la qualité. En effet, l'inspection pour la qualité n'apporte pas (en soi) de la valeur ajoutée mais afin d'éviter le coût de la non-qualité, les entreprises la considèrent indispensable. Des travaux de recherche ont mis en avant des arguments pour la revalorisation des activités d'inspection. L'argument principal qui est souvent avancé est le coût. Il existe de multiples approches de décomposition du coût dont certaines sont introduits en lien avec la qualité.

3.8.1. Modèles et méthodes d'estimation des coûts de la qualité

(Kunzmann et al. 2005) analysent le rôle de la métrologie dans la production et démontrent, comment la métrologie peut générer de la valeur pour une entreprise alors qu'elle est très rarement considérée comme une activité à valeur ajoutée. D'après eux, dans la démarche de production, la métrologie est souvent considérée comme source de dépenses. Mais l'investissement dans la métrologie induit-il des bénéfices suffisants? Does the investment in metrology deliver sufficient benefits?

Le bénéfice apporté par l'inspection repose sur certains facteurs dont la connaissance obtenue afin d'être productif, le coût de métrologie, l'incertitude de contrôle (pertinence

de la mesure pour le contrôle des processus), et la capabilité de la production. Afin de quantifier cette connaissance « reliable quantified information » ils établissent le lien entre le gain de connaissance et le développement du savoir-faire, et l'apport d'expérience et la compréhension (Figure 31).

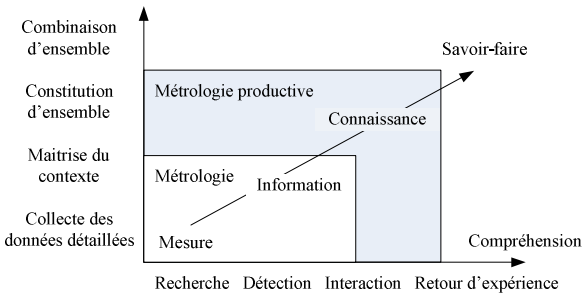


Figure 31. Gain de connaissance due a l'enrichissement d'expérience et de compréhension (Kunzmann et al. 2005)

L'idée de l'intégration du retour d'expérience pour fiabiliser et améliorer un système, a été premièrement employée dans la maintenance des machines par une meilleure estimation des risques (Mil-Std-1629 1980). Ainsi l'identification des risques, l'optimisation et la gestion des actions préventives ont évolué vers une vision plus dynamique (Mili et al. 2009), pour une amélioration en termes de productivité et bénéfice de l'entreprise (Mili 2009). Dans le cadre de RBM (Risk Based Maintenance), (Mili 2009) propose une méthodologie outillée d'aide à la décision et de gestion des retours d'expérience qui permet d'assister les experts pendant les deux phases d'identification et d'estimation des risques. Cependant la capitalisation dynamique des connaissances et du retour d'expériences a été abordée par de multiples points de vue.

En ce qui concerne la métrologie, la connaissance se décompose en deux parties : Explicite, obtenue par des mesures concrètes, et Tactique, obtenue par expérience, interprétation et observation individuelle des experts de l'état du système. Pour entretenir la connaissance du système au mieux, les périmètres d'inspection entrent en jeu ; l'exactitude, la précision, l'incertitude (le rapport entre l'incertitude et la tolérance lorsqu'on mesure la capabilité du processus pour réaliser la tolérance en question) et la fréquence. Par ailleurs, malgré le bénéfice apporté par la métrologie, le coût d'inspection, le contrôle de conformité et le pilotage du processus, doivent être maintenus à un niveau minimum.

L'objectif du pilotage d'un processus de production est de maintenir le produit sur la cible et celui du contrôle de conformité est de détecter le produit hors cible. Le premier limite le coût de détection de la défaillance, alors que le deuxième limite le coût de prévention de la défaillance. Il est donc raisonnable d'avoir l'intention de trouver un équilibre entre le suivi de fabrication et le contrôle de conformité. (Kunzmann et al. 2005) fait apparaître l'évolution du coût de la prévention des défaillances et celui de l'élimination des défaillances tout au long du cycle de vie du produit.

(Duret & Pillet 2011) décomposent le coût de la non-qualité en coût de gestion de la qualité et en coût de la défaillance. Nous avons positionné cette classification par rapport aux étapes de la conception (Figure 32).

Les coûts sont donc décomposés de manière suivante :

- Coût de gestion de la qualité :
  - Coût de la prévention : Le coût des actions visant à éviter la non – qualité, le suivi de fabrication, la maintenance préventive, …
  - Coût de la détection : Le coût des activités de vérification de la qualité, la mesure et l'observation des résultats par inspections et tests…
- Coût de la défaillance :
  - Coût de la défaillance interne : Le coût engendré par des activités telles que la reproduction des produits défectueux, le maintient des produits défectueux dans la chaîne de production jusqu'à la détection, la réduction de productivité…
  - Coût de la défaillance externe : Le coût engendré par la perte de parts de marché, la maintenance de produit externe, la réclamation du client, …

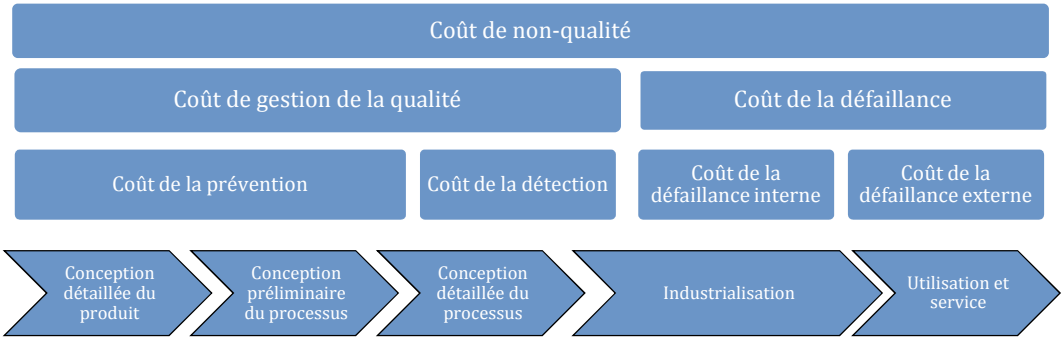


Figure 32. Positionnement de la classification du coût par rapport aux étapes de la conception

A titre d'exemple, prenons le cas où les spécifications sont contrôlées avant l'étape de l'assemblage des pièces. Le coût de mise au rebut sera donc faible mais cette activité d'inspection est loin d'influer directement sur la qualité finale du produit. Toutefois, si les caractéristiques sont contrôlées suite à l'étape de l'assemblage, le coût de mise au rebut ou de ré-usinage sera élevé, mais nous pouvons dire que la qualité finale du produit est assurée. Afin de pouvoir estimer le coût (de qualité, de non-qualité, de l'inspection, …) comme cité par (Duret & Pillet 2011) selon l'étape de la conception et les informations dont on dispose, la méthodologie d'estimation des coûts diffère (Figure 33). Nous rappelons qu'on se situe à l'étape de la conception détaillée où la conception du produit et celle de son processus de fabrication sont effectués.

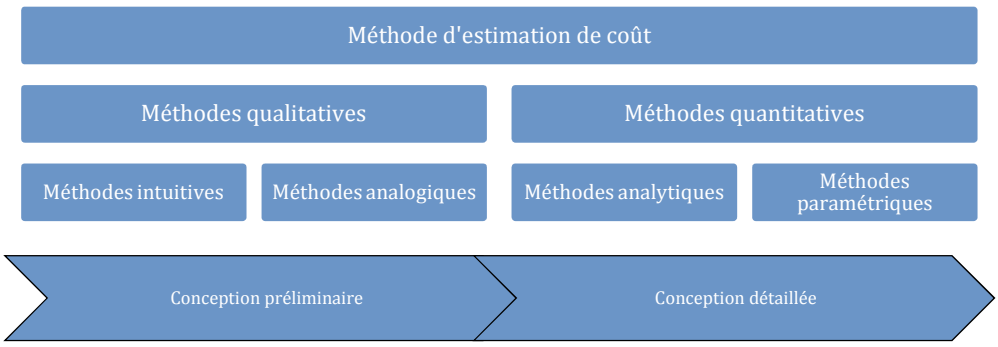


Figure 33. Application des méthodes d'estimation de coût dans la conception

Parmi les catégories de méthodes d'estimation de coût, cet état de l'art se focalise donc sur les méthodes analytiques et paramétriques. Afin de comprendre les forces et les faiblesses de ces catégories, (Etienne 2007) propose une comparaison de leur aptitude dans le contexte particulier de la maîtrise des variations :

- Méthodes paramétriques : Cette catégorie comprend les méthodes d'évaluation des coûts en utilisant des relations mathématiques reliant l'indicateur de coût à d'autres paramètres quantifiables, tels que le volume de produit, le temps, etc., rassemblés comme des méthodes paramétriques. Parmi les nombreuses références disponibles dans la littérature, trois étapes majeures pour cette catégorie sont identifiées ;
  - La première étape, consiste à identifier et collecter tous les paramètres et données considérés comme ayant une influence sur l'indicateur de coût. Cette activité de sélection de paramètres peut être effectuée subjectivement (expérience ou savoir-faire) ou objectivement (analyse des composants principaux).
  - L'étape suivante essaie de trouver à partir de plusieurs modèles mathématiques celui qui démontre le mieux la relation existante liant l'indicateur de performance, et le coût, aux paramètres sélectionnés par l'étape précédente.
  - La dernière étape consiste à valider le modèle mathématique en faisant face à plusieurs cas connus.

En conclusion, la méthode paramétrique est en soi rapide et facile à utiliser une fois les valeurs paramétriques recueillies. Mais contrairement aux méthodes analytiques, elle est difficilement déployée dans un environnement industriel où les paramètres d'entrée sont à la fois contextuels et les liens entre eux complexes. À savoir que les paramètres dépendent souvent des ressources disponibles et sont propres à chaque entreprise et à chaque problème. En effet, le choix des paramètres et le modèle de relation mathématique ont une validité limitée puisqu'ils dépendent de plusieurs caractéristiques (la localisation de l'entreprise, le matériel, les machines, les conditions de coupe, …). En outre, l'évaluation de ces paramètres est coûteuse en termes de temps et en ressources.

- Méthodes analytiques : Les approches analytiques ont pour but également d'évaluer le coût d'une solution en analysant les tâches et activités nécessaires au cours de l'ensemble de son cycle de vie (conception, fabrication, recyclage ...). Les activités principales sont responsables de coûts directs ou indirects et de variations. Parmi les différentes solutions analytiques disponibles, tel que la méthode des form features (Feng et al. 1996) et l'entité coût, ce document se concentre uniquement sur la méthode Activity Based Costing. La méthode ABC a été principalement développée dans les années 1980 (Johnson 1991). Elle consiste à effectuer un « Break down » des activités engagées à la réalisation des objectifs d'une façon directe (productive) ou indirecte (non-productive). La méthode ABC identifie les liens de la consommation et de la causalité entre les produits, les activités, et les ressources. Ces liens sont quantifiés et font émerger le coût avec trois inducteurs :

- Inducteur de ressource qui est utilisé pour allouer les ressources entre les activités. Cet inducteur facilite l'évaluation des coûts.
- Inducteur de coût décrivant le niveau de performance de l'activité et sa consommation de ressources.
- Inducteur d'activité qui est égal à l'unité de travail. Cet inducteur permet de répartir les coûts des activités entre les objets de coûts.

Cette méthode évalue, d'une façon relativement précise et simple à la fois (contrairement aux méthodes paramétriques souvent associées aux modèles mathématiques complexes), le coût du produit réel car il prend en compte les coûts indirects. Néanmoins, la méthode ABC, qui semble être une approche assez puissante et générique, doit faire face à des enjeux majeurs. En effet, la difficulté d'identifier et d'évaluer les inducteurs reste le principal inconvénient de cette méthode.

Les facteurs proposés par (Etienne 2007) qui mènent à ce choix de la méthode ABC sont la sensibilité de l'évaluation, la justesse de l'évaluation, la difficulté de mise en œuvre, la rapidité d'estimation et l'étendue du domaine de validité. Un extrait de schéma de comparaison de la référence est illustré à la Figure 34.

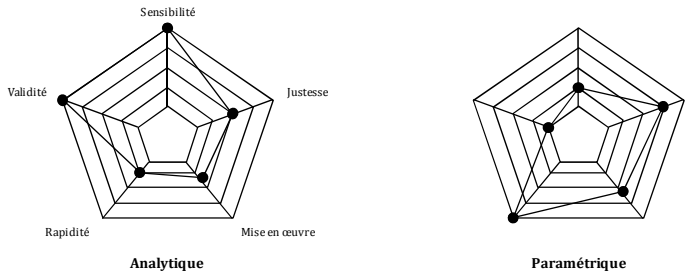


Figure 34. La comparaison de deux approches d'estimation de coût

- Les approches paramétriques : bien précises et très rapides à utiliser dans leur domaine de validité. Ces méthodes sont principalement limitées par leur généralité restreinte.
- Les approches analytiques : bien que le processus d'estimation de ces approches soit assez long, car il génère et analyse toutes les opérations nécessaires pour l'obtention d'un produit, reste attractif en raison de sa flexibilité et de sa précision. En outre, grâce à cette généralité, le coût évalué peut soutenir bien plus qu'une simple dimension financière. En effet, les variations peuvent être traitées par cette approche. Cette capacité est détaillée et expliquée ultérieurement.

En ce qui concerne les approches analytiques et notamment ABC, les inducteurs permettent d'intégrer de multiples critères de décision et indicateurs de performance dans l'estimation du coût, ce qui associe aux alternatives de solutions non seulement une dimension financière mais aussi la qualité prévisionnelle de la solution (Etienne 2007). En ce qui concerne la planification d'inspection, la flexibilité de cette approche la rend apte à prendre en compte les coûts et les inducteurs associés à de multiples niveaux du produit, processus, ressources. Ces indicateurs (taux de non-conformité du produit, fréquence de défaillance due au processus, incertitude de moyen d'inspection, coût de défaillance

interne, coût de défaillance externe …) contribuent à l'estimation de coût comme la conséquence d'une prise de décision lors de la conception.

ABC est un outil d'estimation du coût développé par (Johnson 1991) qui consiste à une décomposition des activités indispensables, productives ou non-productives, pour un produit, et une allocation des ressources support des activités. Les produits consomment des activités, et les activités consomment des ressources. Pour déchiffrer ces liens de consommation et faire émerger le coût par le biais de ressources, trois inducteurs sont définis comme suit et sont illustrés à la Figure 35.

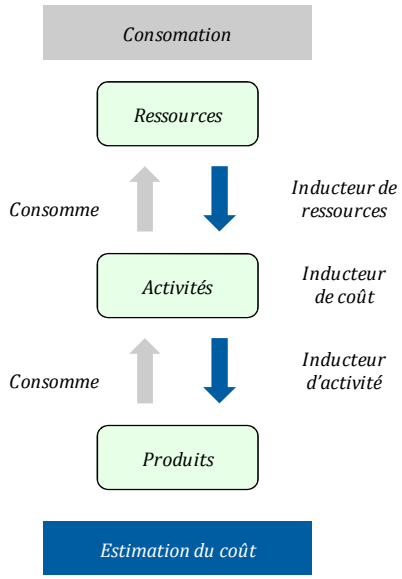


Figure 35. La principe de la méthode ABC

- Inducteur d'activité : Mesure les ressources consommées par l'activité et relie les coûts aux produits
- Inducteur de coût : Décrit la performance de l'activité et sa consommation de ressource
- Inducteur de ressource : Distribue les coûts des activités entre les produits (Équation 3)

Équation 3. La logique de calcul du coût d'un produit par ABC

$$Coût = \sum Inducteur\ d'activité * Inducteur de coût * Inducteur\ de\ ressource * Coût\ de\ ressource$$

L'objectif clé de l'ingénierie des coûts est d'assurer l'exactitude des estimations de coûts et d'éviter les dépassements de coûts (surcoût). Dans ce contexte global plusieurs modèles d'estimation de coût, sont proposés souvent basés sur des approches probabilistes. Cela peut être justifié par le fait que selon l'étape de la conception et par conséquent selon les informations dont nous disposons, et selon l'objectif recherché par l'estimation, il existe des paramètres incertains qui nécessitent une estimation probabiliste.

(Etienne 2007) a établi un modèle d'estimation où l'efficacité de l'ensemble d'une allocation de tolérance et de son processus de fabrication est mesurée par « le coût

pondéré qualité » (Équation 4). Il met en avant la flexibilité de ce modèle et la possibilité d'enrichissement de ce dernier par d'autres coûts (logistiques, environnementaux, …) et d'autres facteurs d'efficacité.

Équation 4. Expression du coût pondéré qualité

$$Coût = \frac{C_{production}}{P(Ok)} + C_{retraitement}.P(NonConforme) + C_{réassortiment}.P(NonMontable) + \cdots$$

Le modèle se décompose en trois parties :

- Le coût de production des produits satisfaisant l'ensemble des contraintes, spécifications, ou exigences. Il est considéré que le coût de production est pondéré par l'efficacité du processus employé,
- Le coût de retraitement des pièces ou produits non-conformes,
- Le coût de réassortiment des produits dû à une inadéquation entre les spécifications et les exigences fonctionnelles ou d'assemblage.

(Moroni et al. 2011) présente une méthodologie pour l'estimation du coût d'inspection des tolérances géométriques dès les étapes préliminaires de la conception. Il considère le coût d'inspection comme la somme des coûts de mesures et d'incertitudes. Le coût de mesure dépend en soi de la stratégie de mesure, la mise en place du poste de mesure, et le temps de mesure (qui varie selon les instruments de mesure discrète ou les instruments de mesure continue) qui sont généralement fixes et estimables d'une manière ponctuelle. L'estimation du coût lié aux incertitudes de mesure est ensuite proposée par une approche probabiliste. L'objectif est l'optimisation du coût d'inspection (en fonction des limites de spécification) étant donné les facteurs qui pourraient entraîner des effets opposés sur les deux parties du coût total ou même entre eux comme la taille de l'échantillon qui diminue l'incertitude de mesure et donc son coût relatif et qui augmente le coût de mesure.

(Savio 2012) propose une estimation du coût d'inspection associée par un seul modèle au coût de processus de fabrication pour l'évaluation d'impact économique de la métrologie sur l'ensemble des décisions relatives au processus de fabrication et à l'inspection. Il met en avant un « cost-benefit model », bien que la nature des bénéfices, tels que l'amélioration de la fiabilité du produit et la réduction relative des coûts de garantie, rende difficile leurs quantifications. Par ce modèle, il propose avant tout l'évaluation économique d'investissement par le coût initial de l'investissement, le taux d'intérêt, …. Ensuite se décompose le bénéfice d'inspection en :

- L'économie de la réduction de la fabrication inefficace en raison des activités à valeur ajoutée sur les pièces défectueuses,
- L'économie de la réduction des coûts de garantie des produits défectueux entrés sur le marché,
- L'économie rendue possible par l'augmentation du savoir-faire, par exemple, une meilleure compréhension de la fonctionnalité des produits, élargissement de la zone de tolérance, meilleure connaissance des processus de fabrication,
- …

L'estimation de tous ces coûts s'ajoute aux coûts directs du processus d'inspection comme celui engendré par l'erreur d'inspection, calculée en fonction de la capabilité du processus et des limites de tolérance.

Les deux dernières méthodologies (Moroni et al. 2011) et (Savio 2012), peuvent être complémentaires puisqu'elles partagent la même vision en ce qui concerne la décomposition des coûts.

L'ensemble des modèles d'estimation de coût proposés par la littérature tendent non seulement à estimer le coût, mais aussi à étudier l'efficacité des solutions, que ce soit sur l'allocation des tolérances, le processus ou le plan d'inspection, et les origines de la non-efficacité. Indépendamment du stade de la conception et du niveau de précision de l'information, il est nécessaire d'évaluer la pertinence des alternatives de la conception. Puisqu'il est insuffisant de traiter uniquement la dimension financière de leur performance, ces modèles proposent un point de vue multicritères, la satisfaction du client et le coût. Une analyse multi-niveaux se présente également par le biais des facteurs intervenant : taux de non-conformité de produit, fréquence de maintenance préventive inhérente au processus, taux de non-détection des moyens d'inspection, … Il existe également dans la littérature, des travaux visant l'estimation de coût des risques.

3.8.2. Modèles et méthodes d'estimation des coûts des risques, CbFMEA

Une autre méthodologie inscrite dans cette approche nommée Cost-based FMEA est développée par (Hassan 2010). Elle a pour but d'élaborer un « conceptual process planning ». Elle intègre le FMEA et ABC, une méthode analytique d'estimation du coût détaillée ci-dessous dans ce même chapitre. Le coût (interne/externe) associé à une défaillance ainsi que le coût des actions correctives sont calculés à l'aide de la méthode ABC. Par cette méthode, la gravité du risque est exprimée en termes de coût puisqu'il s'agit d'une notion facile à comprendre entre les ingénieurs multidisciplinaires. La satisfaction du client par le facteur de la gravité, l'aptitude du processus par le facteur de la fréquence et le coût entrent dans une analyse multicritères et multi-niveaux.

3.9. Key Characteristic Flowdown

Nous avons regroupé les méthodes de maîtrise de risque qui permettent la visualisation de la répartition des risques dans un système de production, sous le nom de Variation Risk Management (VRM). Cette approche a la particularité de pouvoir imposer sa vision globale sur l'ensemble du système, comme un support des autres approches identifiées : maîtrise de qualité, et évaluation (conjointe) de la performance. Elle offre notamment l'outil de KC Flowdown. KCs (Key Characteristics) est un concept apparu au cours des années 80, principalement dans de grandes entreprises américaines comme Boeing ou GM (Boeing Company et al. 1992).

Une caractéristique clé est une propriété du produit, du processus de fabrication, et des ressources qui affecte de manière significative le coût final, l'exécution, ou la sûreté du produit quand elle diverge de cible. Une structure arborescente hiérarchique est généralement employée pour décrire les caractéristiques principales d'un produit. Cette structure arborescente, désignée sous le nom KC Flowdown (Thornton 2003), (Figure 36)

lie les besoins des clients du produit (product KCs) à ses composants KCs (traditionnellement ; ce sont des spécifications dimensionnelles). L'outil dérivé de cela, KC Flowdown, tient compte d'une décomposition du produit et des processus en permettant la traçabilité des causes, des paramètres de bas niveaux, des causes et des effets, et des fonctions de haut niveau. Il est possible d'utiliser cette cartographie des caractéristiques de deux façons : ascendante (bottom up), afin d'analyser les impacts d'une variation sur celles de plus haut niveau ou descendante (top down) pour lister et synthétiser les responsables d'une variation (Etienne 2007). Les relations entre les KCs peuvent prendre plusieurs formes : équations, contraintes, règles…

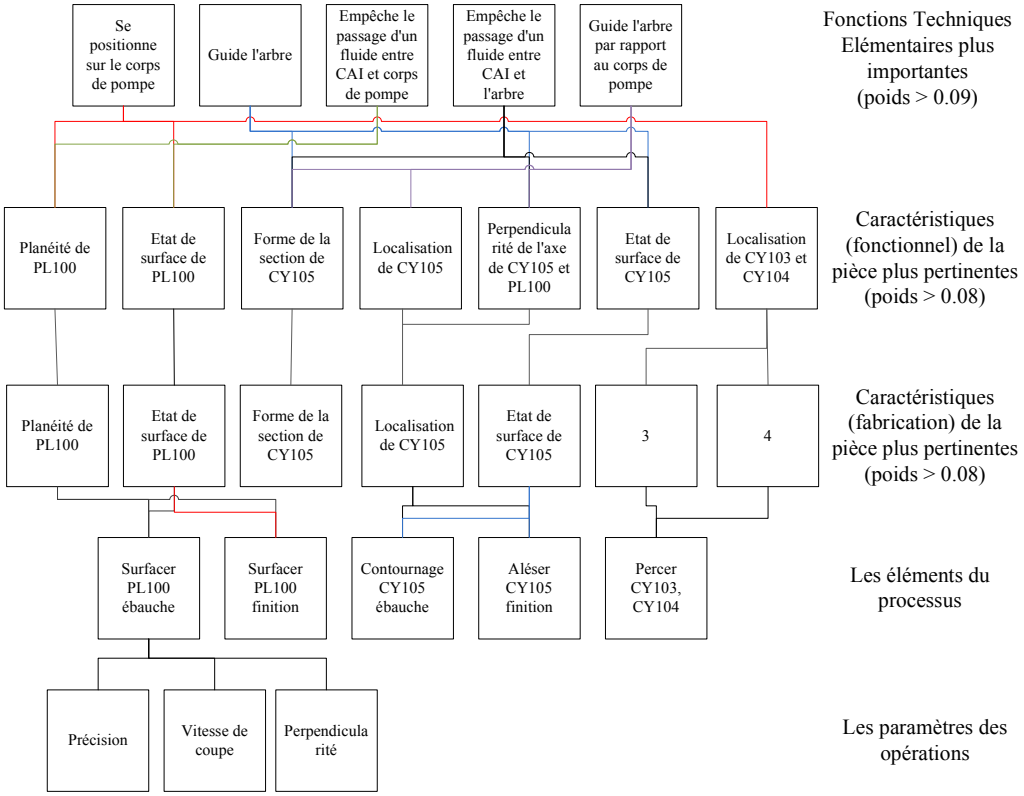


Figure 36. KC Flowdown

L'illustration de l'outil sur l'exemple de la pompe, par souci de brièveté et de clarté, est limitée à une seule pièce, le couvercle du corps de la pompe et l'analyse est restreinte aux 15 fonctions techniques. Elles sont les plus pertinentes selon l'application de QFD sur le même exemple, puisqu'il permet de filtrer rapidement d'une manière subjective les caractéristiques peu pertinentes. Il est difficile de prendre en compte toutes les caractéristiques par KC Flowdown qui interviennent car il devient d'autant plus excessif que nous descendons (Figure 36). Cela peut poser un problème de suivi et de visibilité.

Un KC Flowdown est la hiérarchie des exigences les plus sensibles associées au produit, au processus ou même aux ressources. Cela veut dire que les KCs devraient être traitées à de multiples niveaux. Les exigences de haut niveau ne sont pas obtenues sauf si les caractéristiques de bas niveau les créent. L'aspect multi-niveaux et les corrélations causales entre les KCs sont peu traités avec une telle exhaustivité dans la littérature portant sur les approches métiers.

3.10. Arbre de causes

La méthode de l'Arbre de Causes est la représentation des causes ayant contribué à l'occurrence d'une défaillance et par conséquent la détermination des dérives à l'origine des constats de non-conformité à l'égard des attentes au niveau du produit. Les experts reconstituent l'enchaînement des causes par leurs raisonnements et expériences pour chaque constat. Cet enchaînement permet aux experts de s'apercevoir d'un manque d'information sur le système.

Par rapport à d'autres arbres d'analyse du risque plus répandus, qui s'inscrivent dans le cadre de la sûreté de fonctionnement par la maîtrise des risques ayant une forme d'arborescence (Arbre de défaillances, Arbre d'événements), dans le cadre de « l'identification des exigences » nous avons retenu l'arbre des causes comme le plus adapté puisque :

- L'objectif final est d'assurer la qualité fournie et assurer le fonctionnement du produit. L'arbre d'événements propose une vision de la cause vers la conséquence. Cela ne remet pas en question l'utilité de ce raisonnement inverse pour démontrer la criticité des paramètres bas niveau du système.
- L'arbre de défaillances offre une vision top down, ce qui est compatible avec la logique d'inspection. En revanche, il exploite toutes les combinaisons de causes qui peuvent aboutir à une défaillance. Cela rend sa mise en place difficile d'autant plus que les branches seront associées aux probabilités des événements redoutés. Par ailleurs, on considère que souvent pour « rater » une fonction de haut niveau il suffit d'avoir une seule spécification non-satisfaite.

Cette méthode permet une analyse multi-niveaux mais non multicritères. Nous pouvons pousser l'exploitation jusqu'au niveau du processus malgré sa complexité mais le coût ne pourra jamais intégrer cette analyse. Un extrait simplifié de l'arbre des causes est illustré en Figure 37 pour un constat de l'incapacité de la pompe à réguler la pression d'huile.

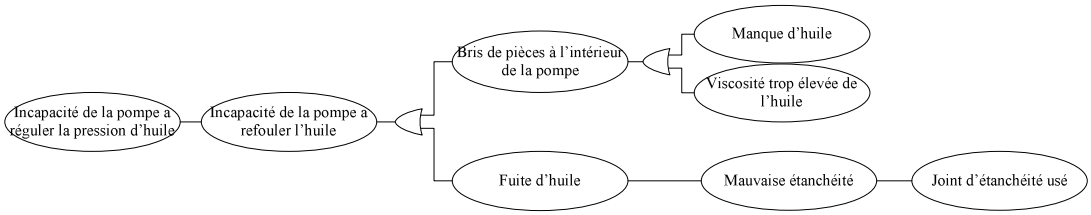


Figure 37. Un extrait simplifié d'un arbre des causes de la pièce C.A.I.

3.11. ABTA

(Etienne 2007) propose une méthode originale « Activity Based Tolerance Allocation » qui réunit deux outils précédemment décrits, ABC et KC Flowdown pour évaluer la pertinence d'une allocation de tolérance. KC Flowdown permet tout d'abord une synthèse descendante pour le développement de l'espace de conception du processus de fabrication apte à réaliser les tolérances allouées. Ensuite il permet une analyse ascendante pour, premièrement quantifier la performance de l'allocation des tolérances et d'autres conditions définies et deuxièmement sélectionner la meilleure gamme parmi celles

retenues par la synthèse descendante. ABC permet une estimation du coût de fabrication impacté par les tolérances. Contrairement aux méthodes actuelles qui tentent de calculer directement le coût de tolérances, ABTA, évalue le coût d'une solution dû aux choix des concepteurs basé sur le concept de l'activité. Soutenues par des outils statistiques tels que la simulation de Monte Carlo, les activités principales contribuant à la qualité du produit sont analysées afin de vérifier si les pièces produites répondent aux exigences fonctionnelles.

La synthèse descendante tient compte de la satisfaction du client et l'analyse ascendante du critère de l'aptitude du processus. Le critère de coût s'ajoute également à ces deux derniers pour une analyse multicritères. La structure de KC Flowdown intègre dans cette méthode une analyse multi-niveaux.

Après avoir introduit certain outils et méthodes de la littérature, la section suivante propose une synthèse de ces derniers abordés dans ce chapitre, au regard des facteurs de détermination de l'efficacité, cités auparavant, qui permet de récapituler l'analyse de l'état de l'art.

4. Synthèse des approches, méthodes, et outils de la littérature

Pour la synthèse des outils et méthodes vus dans ce chapitre, les questions suivantes sont posées pour chaque outil :

- Propose-t-il une analyse multicritères ?
  - Quels sont ces critères ?
- Propose-t-il une analyse multi-niveaux ?
  - Tient-il compte des relations causales entre les multiples niveaux ?
- Est-il facile à mettre en œuvre ?

Les tableaux synthétiques des outils et méthodes de l'approche de la maîtrise de la qualité (Figure 17) distinguent deux approches métiers ; le processus de contrôle de conformité et le suivi de fabrication (Tableau 8 et Tableau 9). Nous proposons ainsi un tableau synthétique des outils et méthodes d'évaluation de la performance (Figure 17) qui propose d'une manière explicite ou implicite une évaluation conjointe d'au moins deux facettes de la performance ; satisfaction du client, aptitude de processus, risque, coût, … (Tableau 10). Par la suite, un tableau est également proposé qui réunit les outils et méthodes de gestion de risque ou « Variation Risk Management » (Figure 17) (Tableau 11). Comme illustré en Figure 17, plusieurs outils s'inscrivent dans plus d'une approche.

Pour plus de clarté prenons l'exemple d'AMDEC produit qui apparait au Tableau 8 parmi les outils d'aide à la conception des processus de contrôle de conformité. Il propose l'identification des exigences par une analyse multicritères où la gravité de défaillance prend en effet en compte la satisfaction du client. De manière égale, la fréquence d'apparition des défaillances note l'aptitude du processus, et la détection met en évidence le risque de non-détection de l'inspection. Cet outil plutôt facile à mettre en œuvre, amène les experts à identifier les effets et les causes de la défaillance redoutée et alors à une analyse multi-niveaux. Cependant les relations causales ne sont prises en compte que d'une manière implicite par l'expert.

Tableau 8. Outils et méthodes de la maîtrise de qualité, approche métier du contrôle de conformité

L'axe des approches métiers	Outils	Nature des critères d'évaluation	Satisfaction du client / Aptitude de processus / Risque / Coût	Nature des relations causales (Causalité entre les paramètres qualitative / quantitative, niveau de sensibilité, niveau d'importance)	Analyse mono-niveau ou multi-niveaux	Facilité de mise en œuvre
Outils d'aide à la conception des processus de contrôle de conformité	Analyse de la valeur	Multicritères : Satisfaction du client, Coût de réalisation		-	Mono-niveau (explicitement)	++
	AMDEC Produit	Multicritères : Gravité : Satisfaction du client, Fréquence : fréquence d'apparition de défaillance (aptitude de processus), Détection : difficulté de détection de défaillance		Aucune sauf celles utilisées implicitement par l'expert	Multi-niveaux (la gravité des fonctions de produit vs. la fréquence de défaillance pièce)	++
	QFD II	Satisfaction du client (explicitement)		Qualitative, Niveau de description, Niveau d'importance (une grille d'importance)	Multi-niveaux	+
	Matrice d'impact	Multicritères : Gravité : Satisfaction du client, Fréquence : fréquence d'apparition de défaillance (aptitude de processus), Détection : Risque de non-détection		Qualitative, Coefficient d'influence	Multi-niveaux (fonction de produit et capabilité de processus)	++
	Rough-cut process planning for quality [Chin, 2003]	Multicritères : Satisfaction du client, Aptitude de processus		Qualitative (caractéristiques de la qualité des éléments du processus), Quantitative (optimisation de CCP)	Multi-niveaux (identifier / traduire les caractéristiques de la qualité aux éléments du processus)	–
	Arbre des causes	Monocritère Satisfaction du client (Commencement par une occurrence d'une défaillance) (parfois risque de défaillance)		Qualitative (sans précision de probabilité d'impact par le jugement des experts) (parfois quantitative)	Multi-niveaux	++

Prenons l'étude de la capabilité composite, CCP, en Tableau 9, qui réunit les outils d'aide à la conception des processus de suivi de fabrication (pour l'identification des paramètres les plus critiques du processus). Par le biais de l'intervalle de tolérance, il prend en compte le critère de satisfaction du client et par la dispersion réelle du processus, le critère de l'aptitude de celui-ci. Les spécifications attendues par le processus se situent au niveau de la pièce ou du produit. Nous pouvons dire alors qu'il propose une analyse multi-niveaux et multicritères. À savoir que la conformité d'un produit dépend de multiples spécifications qui contribuent chacune par un coefficient d'influence à l'estimation de CCP. Ainsi les relations causales sont prises en compte.

Tableau 9. Outils et méthodes de la maîtrise de qualité, approche métier du suivi de fabrication

L'axe des approches métiers	Outils	Nature des critères d'évaluation	Satisfaction du client / Aptitude de processus / Risque / Coût	Nature des relations causales (Causalité entre les paramètres qualitative / quantitative, niveau de sensibilité, niveau d'importance)	Analyse mono-niveau ou multi-niveaux	Facilité de mise en œuvre
Outils d'aide à la conception des processus de suivi de fabrication	AMDEC Processus	Multicritères : Gravité : Satisfaction du client Fréquence : fréquence d'apparition de défaillance (aptitude de processus) Détection : difficulté de détection de la défaillance		Aucune sauf celles utilisées implicitement par l'expert	Multi-niveau (la gravité des effets vs. la fréquence des causes)	++
	QFD III	Multicritères : Satisfaction du client Aptitude de processus (capabilité)		Qualitative	Multi-niveaux	+
	Matrice d'impacte	Multicritères : Gravité : Satisfaction du client Fréquence : fréquence d'apparition de défaillance (aptitude de processus) Détection : Risque de non-détection		Qualitative Coefficient d'influence	Multi-niveaux (fonction de produit et capabilité de processus)	++
	Rough-cut process planning for quality [Chin, 2003]	Multicritères : Satisfaction du client Aptitude de processus		Qualitative (caractéristiques de la qualité aux éléments du processus) Quantitative (optimisation de CCP)	Multi-niveaux (identifier / traduire les caractéristiques de la qualité aux éléments du processus)	-
	Capabilité	Multicritères : La difficulté d'obtention Satisfaction du client		Aucune sauf celles utilisées implicitement par l'expert	Multi-niveaux (produit / processus)	++
	Capabilité inertielle	Multicritères : La difficulté d'obtention Satisfaction du client Coût implicitement		Aucune sauf celles utilisées implicitement par l'expert	Multi-niveaux (produit / processus)	++
	CCP	Multicritères : La difficulté d'obtention Satisfaction du client		Qualitative Coefficient d'influence	Multi-niveaux (produit / processus)	++
	CbFMEA	Multicritères : Satisfaction du client La difficulté d'obtention Coût de défaillance (interne / externe)		Quantitative (Coût) Qualitative	Multi-niveaux	+
	Arbre des causes	Monocritère Satisfaction du client (Commencement par une occurrence d'une défaillance) (parfois risque de défaillance)		Qualitative (sans précision de probabilité d'impact par le jugement des experts) (parfois quantitative)	Multi-niveaux	++

En ce qui concerne les outils et méthodes d'évaluation (conjointe) de performance en Tableau 10, une distinction est faite selon les critères qui font l'objet de l'évaluation : l'aptitude du processus et la satisfaction du client, le risque et le coût, ainsi que le coût et la satisfaction du client. A titre d'exemple, CbFMEA propose l'évaluation du risque de

défaillance en termes de coût en passant par une analyse multicritères comme multi-niveaux (comme tout autre type d'AMDEC).

Tableau 10. Outils et méthodes d'évaluation de performance

L'axe d'évaluation de la performance (l'objet de l'évaluation)	Outils	Nature des critères d'évaluation		Nature des relations causales (Causalité entre les paramètres qualitative / quantitative, niveau de sensibilité, niveau d'importance)	Analyse mono-niveau ou multi-niveaux	Facilité de mise en œuvre
		Satisfaction du client				
		Aptitude de processus				
		Risque				
		Coût				
Aptitude de processus (+qualité)	Capabilité inertielle	Multicritères : La difficulté d'obtention Satisfaction du client Coût implicitement		Aucune sauf celles utilisées implicitement par l'expert	Multi-niveaux (produit / processus)	++
	CCP	Multicritères : La difficulté d'obtention Satisfaction du client		Qualitative Coefficient d'influence	Multi-niveaux (produit / processus)	++
Evaluation de risque (+coût)	CbFMEA	Multicritères : Satisfaction du client La difficulté d'obtention Coût de défaillance (interne / externe)		Quantitative (Coût) Qualitative	Multi-niveaux	+
Estimation de coût (+qualité)	CbFMEA	Multicritères : Satisfaction du client La difficulté d'obtention Coût de défaillance (interne / externe)		Quantitative (Coût) Qualitative	Multi-niveaux	+
	Optimisation du bénéfice apporté par le contrôle *(Kunzmann*, 2005)	Multicritères : Capabilité (incertitude / tolérance) du processus de contrôle et / ou du moyen de contrôle Coût de contrôle d'interne / externe (impactée par le risque de contrôle)		–	–	+
	Quality Driven ABC	Multicritères : Satisfaction du client Aptitude de processus Risque de non-détection Coût de réalisation		Aucune sauf celles utilisées implicitement par l'expert (sélectionnées comme influençant le Coût) Quantitative	Multi-niveaux (produit, processus, ressource)	++
	ABTA	Multicritères : Satisfaction du client (tolérancement) Risque des variations Coût de réalisation		Quantitative Qualitative	Multi-niveaux (produit processus …)	-

Le Tableau 11 regroupe les outils et méthodes de gestion de risque dont KC Flowdown. Cet outil offre par sa structure, une vision sur l'ensemble du système. Ce qui permet de visualiser les exigences de plus haut niveau du produit (pour la satisfaction du client) jusqu'aux paramètres de plus bas niveau du processus (pour l'aptitude du processus) et ainsi de parcourir les risques (de variation) liés aux effets et aux causes dans le système. Son analyse multicritères comme multi-niveaux, peut prendre des dimensions très importantes pour un système complexe et ainsi devenir difficile à mettre en œuvre surtout lorsque les relations causales sont traitées d'une manière quantitative.

Tableau 11. Outils et méthodes de gestion de risque

Gestion de risque	Outils	Nature des critères d'évaluation	Satisfaction du client Aptitude de processus Risque Coût	Nature des relations causales (Causalité entre les paramètres qualitative / quantitative, niveau de sensibilité, niveau d'importance)	Analyse mono-niveau ou multi-niveaux	Facilité de mise en œuvre
Variation risk management	KC Flowdown	Multicritères : Satisfaction du client La difficulté d'obtention Coût de défaillance (de variation) Risque de défaillance		Qualitative Quantitative	Multi-niveaux	– –
	Arbre des causes	Monocritère Satisfaction du client (Commencement par une occurrence d'une défaillance) (parfois risque de défaillance)		Qualitative (sans précision de probabilité d'impact par le jugement des experts) (parfois quantitative)	Multi-niveaux	++
	ABTA	Multicritères : Satisfaction du client (tolérancement) Risque des variations Coût de réalisation		Quantitative Qualitative	Multi-niveaux (produit processus …)	-

5. Conclusion

Cette présentation et analyse de l'état de l'art sur les outils et méthodes classiques conduit à une investigation de leurs complémentarités en fonction des besoins du processus décisionnel : une vision multicritères et multi niveaux. De notre point de vue, l'outil idéal serait celui capable d'évaluer les critères souhaités au niveau du produit, de la pièce et du processus de fabrication.

Dans un premier temps, dans le cadre de « L'identification des exigences », le rôle des outils et méthodes revus précédemment, est l'identification des fonctions et caractéristiques cruciales pour la qualité finale ainsi qu'à la performance globale et l'exploitation des liens de causalité existants. Cela comprend le fonctionnement attendu par les concepteurs, les attentes du client ou la qualité perçue par l'utilisateur et les objectifs internes ou externes à l'entreprise, sur le plan économique, technique ou stratégique. D'un point de vue de la qualité, ces exigences feront potentiellement l'objet d'inspection. Ainsi nous pouvons répondre à la question initiale de la démarche de planification d'un plan d'inspection : Quoi contrôler ?

Ensuite viennent les questions suivantes : Comment contrôler ? Quand contrôler ? Pour mieux répondre à cette question, l'état de l'art s'est intéressé à l'évaluation de la performance globale d'inspection (au regard de la performance réelle du processus de fabrication) afin de trouver le meilleur compromis pour un plan d'inspection effectif vis-à-vis des exigences et critères.

Il est donc important de pouvoir **structurer l'inspection en cohérence avec la conception du produit et son processus de fabrication, en se basant sur les moyens dont nous disposons.** La planification d'inspection nécessite donc une intégration

efficace avec le modèle de produit et la gamme de fabrication. Par exemple l'incertitude de mesure, impactant la performance d'inspection, varie même en utilisant la même station d'inspection pour surveiller différents postes de travail ayant des capabilités de production différentes. Elle varie également lors de l'utilisation de la même station d'inspection sur la même station de travail lorsque la tolérance est changée (Shiau 2003).

Un produit n'est de toute façon considéré conforme que si aucune caractéristique de la qualité est non-conforme. La nécessité d'un meilleur outil d'aide à la décision augmente lorsque l'interdépendance des décisions prises lors des différentes étapes de la conception, la complexité, et les liens de causalité de produits augmentent et le cycle de développement du produit diminue (Zhao et al. 2009).

Jusqu'à maintenant, la nécessité d'une planification d'inspection efficace, face à des variations a été soulignée et ce, quelle que soit l'étape où le plan d'inspection est élaboré. Nous avons fait l'hypothèse d'une conception cohérente du produit et de son processus de fabrication déjà réalisée. Cependant, l'idéal a été défini comme la conception intégrée du produit-processus-inspection. Vu le contexte, le positionnement proposé de ce travail par rapport aux étapes classiques du processus de la conception, et les grandes questions de recherche identifiées en chapitre 1, cet état de l'art nous a montré par la suite les informations et connaissances qui peuvent éventuellement intégrer la prise de décision relative à la génération d'un plan d'inspection. Nous nous sommes intéressés notamment par ce chapitre à l'aptitude des outils et méthodes pour répondre à ces questions. Ces deux chapitres (Figure 38) sont les premières étapes d'un schéma évolutif présenté à la Figure 1.

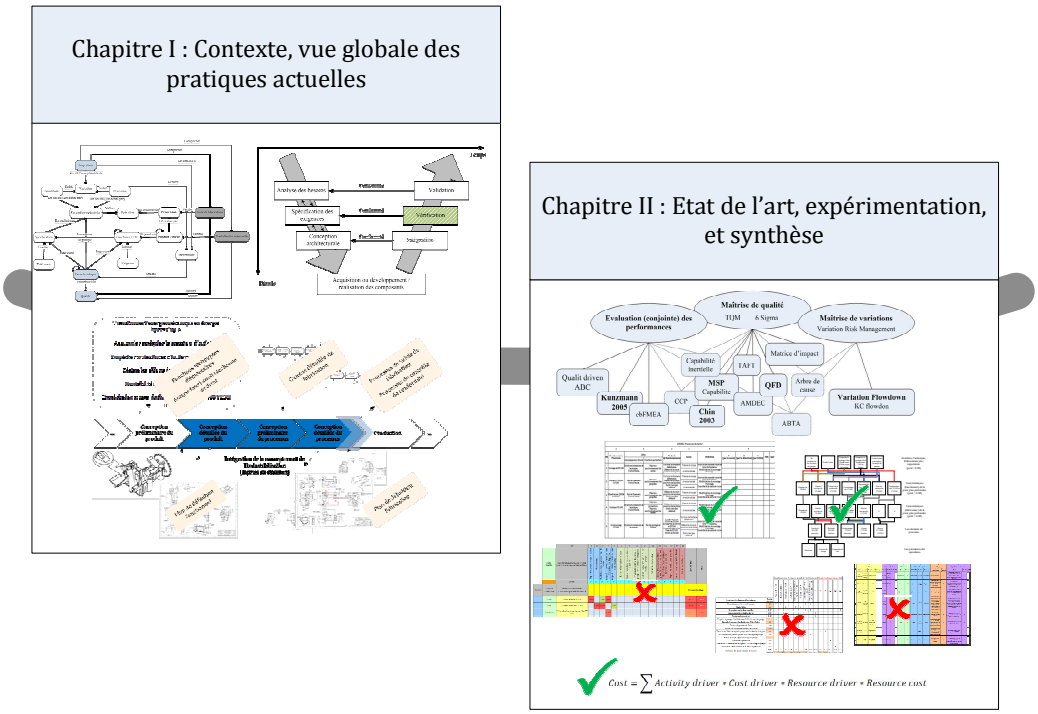


Figure 38. Positionnement des apports des chapitres 1 et 2, au développement de la solution

Le constat est que la majorité des outils ne traitent qu'en partie ces informations. **Nous souhaitons cependant élaborer une démarche de la prise de décision qui rassemble**

et traite toutes les informations nécessaires par le biais des outils adaptés pour proposer un plan d'inspection optimal. Nous avons aussi constaté que les industriels sont confrontés à deux facettes de la qualité : produits et des processus. Pour atteindre ces objectifs contradictoires, les difficultés principales et contraintes pour les industries ont été discutées et les outils d'estimation de ces multiples dimensions de la performance ont été revus pour répondre aux objectifs internes et aux attentes externes. Ils sont considérés comme les principales lignes directrices de la proposition, qui nous amènent à développer un cadre générique comme aide à la décision pour la génération d'un plan d'inspection en tenant compte de nombreux aspects de la performance globale du système de production. Dans ce cadre de planification de l'inspection, deux conditions principales doivent être intégrées; l'analyse multicritères pour répondre à la performance globale et une analyse multi-niveaux vers une co-conception de contrôle de conformité du produit et le suivi du processus de fabrication (la planification des activités d'inspection au juste besoin).

Chapitre III – Cadre d'une nouvelle méthodologie pour la génération d'un plan d'inspection

L'application des outils et méthodes retenus de la littérature pour la génération d'un plan d'inspection ne peut être efficace que si elle est menée d'une façon structurée par un cadre de prise de décision enrichi par la connaissance et l'expertise métier formalisée au sein de ce dernier. Dans un monde complexe, une prise de décision doit tenir compte d'objectifs multiples et souvent interdépendants. Le résultat de ces activités opérationnelles dépend fortement de la définition des critères qui pilotent la prise de décision. Nous mettons en avant la nécessité d'une activité de nature stratégique en charge de l'élaboration des critères ainsi que leurs pertinences, pour la prise de décision par des activités opérationnelles. Le cadre méthodologique est décomposé en quatre sous-activités. Chacune de ces sous-activités est modélisée en IDEF0 afin de formaliser leurs éléments d'entrée, et de contraintes sous forme de contrôle, et les ressources nécessaires comme support de l'exécution de chaque activité.

1. Démarche outillée de « Computer Aided Inspection Planning »

Dans ce chapitre nous souhaitons aborder la proposition d'un cadre explicite de prise de décision. Notamment après le constat de la multitude des informations traitées souvent par les outils d'une manière non-structurée, et des sous-objectifs et exigences souvent contradictoires mais indispensables pour un plan d'inspection, nous mettons en avant l'intérêt d'un cadre méthodologique de Computer Aided Inspection Planning (CAIP). En se référant à la Figure 6, le plan d'inspection peut se trouver en position de réunir les activités de suivi de fabrication et de contrôle de conformité.

En amont de ce stade de la planification d'inspection, une approche méthodologique intégrant des modèles de données, de connaissances enrichies, semble un préalable indispensable, dans un environnement d'un système de support générique de Computer Aided Process Planning (Wong et al. 2006). D'une manière générale, la planification des processus est une activité clé pour les concepteurs pour évaluer l'aptitude à la fabrication (manufacturability), le coût, et le temps de fabrication en phase de développement (Feng & Zhang 1999). Nous pouvons considérer le CAPP comme un élément essentiel de l'ingénierie simultanée. Mais pour démontrer sa légitimité, il est important de se poser deux questions : Qu'est-ce que la planification ? Pourquoi la planification ?

La planification n'est pas un simple ordonnancement des tâches ni seulement un lien essentiel entre la conception et la fabrication, mais est également une activité décisive pour le bon déroulement d'une entreprise. Elle est un problème multi-perspectif. La planification comprend la réalisation des objectifs, la résolution de problèmes, le raisonnement par contraintes, l'utilisation des ressources et la maîtrise des contradictions des objectifs [Ham 1988]. La planification du processus de fabrication peut être considérée comme le lien de coordination entre l'intention des ingénieurs de conception et celles des ingénieurs de fabrication qui prend en compte des ressources disponibles et du temps donné (Feng & Zhang 1999), évoquent par une revue de la littérature, l'absence d'interfaces et de modèles d'information pour permettre l'intégration de ces étapes. Il développe un modèle d'activité initiale pour la planification des processus où les fonctions et le flux d'information sont détaillés (Figure 39).

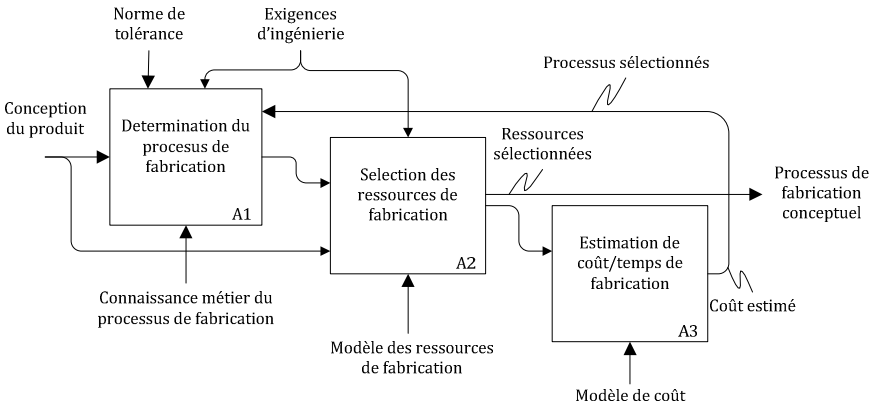


Figure 39. Décomposition fonctionnelle de la planification de processus de fabrication (Feng & Zhang 1999)

A ce jour, comme **la nécessité d'intégrer et l'industrialiser la conception** augmente, le besoin du système de planification plus robuste, augmente en conséquence.

Depuis les années 70, il a été reconnu par la communauté académique comme industrielle que la planification intégrée dans un système de production est vitale pour que l'entreprise perdure dans le temps (Mili 2009) (Demoly 2010). Néanmoins la nature complexe et dynamique du domaine de la planification, demande des efforts significatifs pour l'analyse, et la **modélisation** des activités de planification.

En tant que partie intégrante de la planification du processus, la planification d'inspection rejoint ce même effort d'intégration de la conception et de l'industrialisation. Elle se caractérise par la vérification de la qualité du produit et de l'aptitude du processus de fabrication. D'autant plus que dans le contexte plus large de l'ingénierie simultanée, le couplage de la planification du processus et d'inspection, entraîne la naissance de la boucle de retour de l'assurance de la qualité. Le CAIP dépasse donc la simple acceptation ou rejet des produits mais il consistera à concevoir et à produire de la qualité dés le début, tout en réduisant le coût de mise au rebut et de « ré-usinage ».

Le cadre méthodologique du CAIP que nous proposons comprend trois **activités opérationnelles**, qui remplissent deux **objectifs opérationnels** (voir Chapitre 1, 1.2) de contrôle de conformité et de suivi de fabrication, traduit sous forme de question : Quoi contrôler ? Comment contrôler ? Quand contrôler ? Ce cadre comprend également une **activité stratégique** dans le but de la définition des critères qui découlent des **objectifs stratégiques** (voir Chapitre 1, 1.3).

La fonctionnalité du produit, la performance du processus et l'inspection sont interdépendants, de notre point de vue. Cette hypothèse de causalité rend la décision complexe et demande avant tout une modélisation efficace dont le développement permet d'identifier au fur et à mesure les entrées nécessaires, les besoins en termes de ressources et les contraintes opérationnelles. Pour structurer la solution qui tient compte de cette interdépendance, une modélisation des activités du processus décisionnel s'impose. Parmi les méthodes et techniques de modélisation de processus existantes, certaines sont souvent retenues selon le contexte : IDEF, GRAI, BPMN, Activity diagram …. En termes d'efficacité de modèles nous proposons l'utilisation d'IDEF0 ou de SADT qui répondent largement aux besoins de la modélisation, notamment des flux d'informations. La traduction des concepts entre différentes méthodes et techniques est toujours possible avec une attention particulière aux concepts élémentaires et à leurs points communs.

La plupart de ces méthodes de modélisation et d'évaluation de performance appliquées en entreprise, nommées les « Business models », sont non seulement axées sur le flux d'information et la causalité mais aussi sur la temporalité. IDEF0 n'en fait pas partie (Le Pavic et al. 2013). Cependant il applique indirectement les contraintes temporelles des activités (antériorités) par le flux d'information. Nous avons retenu IDEF0, comme modélisation statique qui offre une capacité de décomposition des activités tout en restant communicative, une syntaxe simple, et une approche hiérarchique par les quatre flux suivants (Vernadat 1999) :

- Les entrées, ou les objets à traiter, qui vont subir une transformation
- Les entrées de contrôle, sont des informations qui peuvent prendre des formes différentes ; directive, déclencheur, règle, contrainte, …

- Les sorties, sont les attentes de l'activité, les entrées transformées
- Les mécanismes, sont des moyens et des ressources nécessaires à l'exécution de l'activité

L'activité « Concevoir un processus d'inspection » prévoit d'offrir le meilleur compromis (en valeur) entre l'efficacité du plan d'inspection et le coût associé. Dans la pratique industrielle, cette activité est positionnée suivant l'étape de la conception détaillée du produit et du procédé de fabrication. Toutes les descriptions de produits, de processus et les capabilités de fabrication sont considérées comme des données d'entrées de cette activité (Figure 40). À noter que certains éléments de contrôle illustrés avec des lignes pointillées « Alertes issue du processus de conception du produit et son processus de fabrication » et « Retour d'expérience », sont ceux dont les informations sont issues de l'expérience et donc considérées comme déclencheuses de décision.

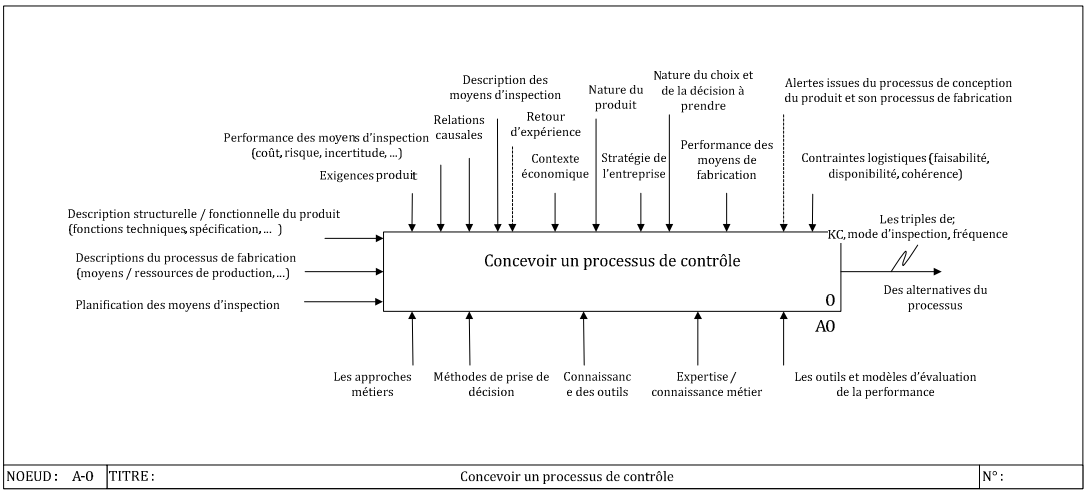


Figure 40. Vue globale de la prise de décision sous le formalisme IDEF0

Dans ce cadre, l'exécution des activités opérationnelles exige une analyse multicritères dont l'élaboration des critères est principalement effectuée par une sous-activité stratégique. L'élaboration des critères dépend fortement des objectifs stratégiques de la co-conception, décrits en chapitre 1, section 1.3. Cette définition stratégique est inhérente à la stratégie de l'entité industrielle, au contexte économique et au type de produit. Par la suite, afin de répondre aux trois questions décrites ci-dessus, le flux d'information implique la définition de trois activités opérationnelles avec les relations d'antériorité:

- Identifier les caractéristiques-clefs à suivre/contrôler
- Identifier le mode/le moyen d'inspection approprié à chacune des caractéristiques-clés
- Identifier la fréquence adaptée d'inspection et/ou les points d'insertion des tâches d'inspection

Ainsi, l'activité « Concevoir un processus d'inspection » est décomposée en quatre sous-activités détaillées à la Figure 41. Les critères stratégiques élaborés sont des lignes directrices, comme le soutien aux activités opérationnelles. L'élaboration d'un plan

d'inspection a pour but d'organiser les activités de contrôle de conformité et de suivi de fabrication à effectuer au niveau des paramètres du processus et des caractéristiques du produit, et de répertorier les méthodes, moyens et modalités pour ces activités de nature préventive, corrective, ou détective.

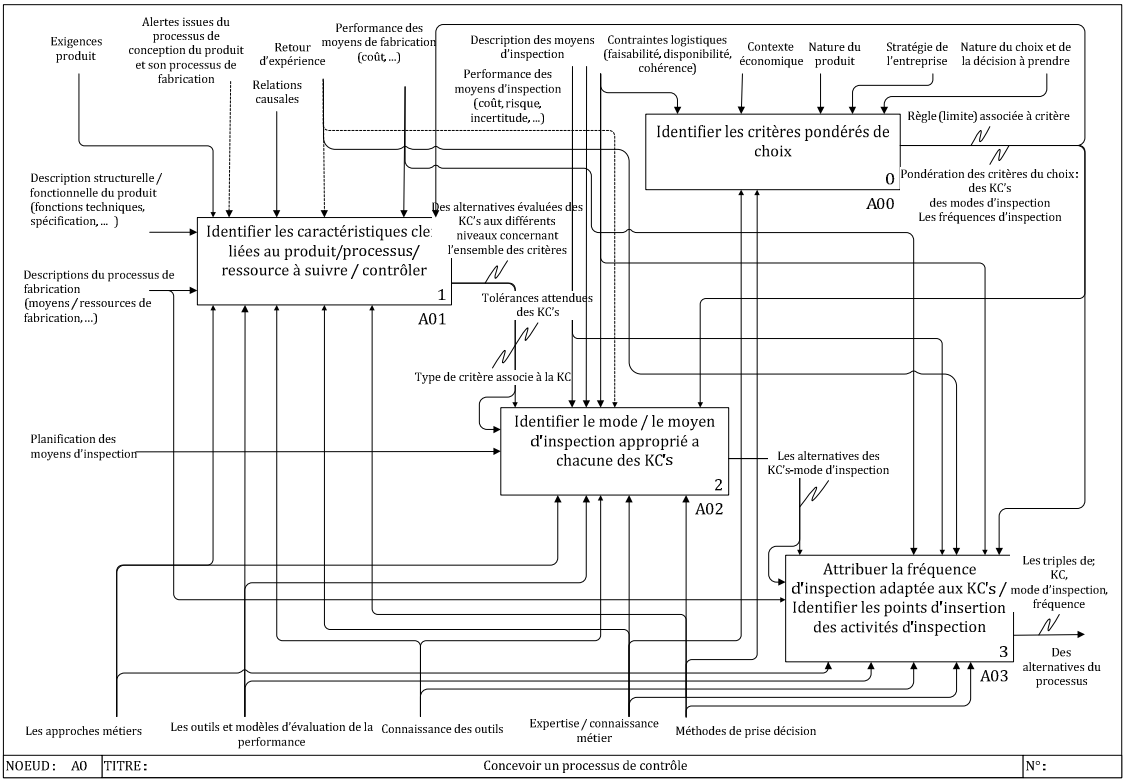


Figure 41. Les sous-activités de la prise de décision sous le formalisme IDEF0

2. Activités du cadre méthodologique

Cette section a pour but de détailler les activités du cadre méthodologique notamment par le développement de leurs finalités et flux d'informations impliqués. Les flux d'informations doivent être explicités dans ce cadre de la prise de décision. Ce cadre méthodologique contribue à l'organisation d'un certain niveau d'intégration au cours du processus de développement. Les informations proviennent donc d'autres étapes de la conception (produit et processus), du contexte concurrentiel, de sources extérieures à l'entreprise, ou d'autres activités de la prise de décision. En revanche, les sorties modélisées pour une activité sont celles, destinées plus ou moins exclusivement à d'autres activités de cette même démarche. Une définition est proposée pour chaque entrée, contrôle, et ressource ou mécanisme de la prise de décision. Cependant les ressources, majoritairement axées sur les outils de la prise de décision, sont détaillées en chapitre 4 avec pour objectif de proposer l'outil le plus approprié à la prise de décision. Nous avons pu comprendre que ce choix d'outils dépend fortement des critères à évaluer. À travers cette section, les critères globaux sont abordés et selon l'objectif de chaque sous-activité l'adaptation de leur définition est proposée.

2.1. Activité stratégique

L'idée de dissociation de l'élaboration des critères à une activité stratégique distincte est venue après la formalisation des activités opérationnelles, leurs objectifs, et leurs critères de prise de décision. Ces critères sont à première vue différents selon l'objectif de chacune des activités opérationnelles mais sont en effet des sous-critères qui découlent d'autres critères globaux abordés en section 2.2. C'est la définition de ces critères globaux (communs à toutes les activités opérationnelles) et leurs sous-critères, (non-communs aux activités opérationnelles) qui motive cette dissociation. Ainsi la prise en compte d'un ensemble de critères pilotant le choix est proposée. Ces critères ne sont quasiment jamais tous réunis pour optimiser la planification d'inspection. Pour cela une hypothèse est faite : la décision prise par chacune des trois activités opérationnelles n'influence pas l'identification des critères pour les autres activités. L'indépendance des critères et des décisions prises au cours de chaque sous-activité, mène à séparer l'activité d'identification des critères et aussi d'envisager cette activité comme stratégique (non opérationnelle), pour la génération d'un plan d'inspection. Le « pilote » de cette activité serait les objectifs de l'entreprise, regroupés sous trois catégories de critères de choix. Alors trois grilles de critères pour trois sous-activités sont élaborées. Les critères identifiés sont : « La satisfaction du client », « La difficulté de réalisation » et « Le coût ». Les critères pris en compte lors de chaque sous-activité opérationnelle se développent en fonction de l'objectif spécifique de l'activité. L'identification des critères s'exécute comme une activité en amont de la décision opérationnelle.

Les sorties attendues de cette activité A00 sont les critères pondérés des choix décisionnels. Cette pondération impacte les décisions intermédiaires de la démarche et en conséquence les solutions finales. Une fois les alternatives de la solution et l'évaluation des critères associés obtenues, la pondération permet d'agréger plusieurs critères pour estimer une note d'adéquation pour chaque solution finale issue de l'ensemble des activités.

Il est à noter que cette activité stratégique n'a aucune entrée qui fasse l'objet d'une modification au cours de l'activité. Les contrôles modélisés pour cette activité sont considérés comme quasi stratégiques pour l'entreprise. C'est ainsi le cas des critères élaborés. Cependant ces critères stratégiques contribuent aux activités opérationnelles. Quelle que soit l'activité décisionnelle ou opérationnelle, la connaissance métier, les objectifs de l'entreprise, et la performance attendue du produit seront invariants mais néanmoins utiles afin d'identifier les critères de choix. Il est important de savoir que les contrôles ne sont pas toujours des contraintes mais peuvent aussi jouer un rôle de déclencheurs tel que le « contexte économique » qui déclenche le besoin d'une attention particulière dans l'élaboration et la pondération du critère de « coût » qui impacte en soi la décision opérationnelle.

- Contexte économique et concurrentiel

Toutes les entreprises font partie de l'économie, mais ont rarement beaucoup d'influence sur celle-ci. Au contraire, la façon dont fonctionne l'économie a une influence significative sur les entreprises. Une étude du contexte économique et concurrentiel (ou étude du marché) affecte la décision stratégique de la pondération des critères tels que la

satisfaction du client et le coût. La pondération de ces critères affecte par la suite le choix des alternatives de plan d'inspection.

- Nature du choix et de la décision à prendre

Lors de la définition des critères de la prise de décision, l'objectif ou la nature du choix effectué par chaque sous-activité détermine les critères et leurs pondérations (voir les sections 2.2.1, 2.2.2, et 2.2.3).

- Nature du produit

La nature du produit pèse énormément sur les décisions relatives à la standardisation ou à l'adaptation de l'offre produit.

Il existe plusieurs classifications de produits développées. Par exemple, il est possible de classer les produits selon le type de besoin satisfait [Maslow 1987] :

- Les produits qui satisfont les besoins primaires et qui sont nécessaires à la vie humaine. Ce sont, par exemple : la nourriture, les vêtements, le logement, ... ;
- Les produits qui satisfont les besoins secondaires, nécessaires à la vie en collectivité comme les communications, l'urbanisme, les services de restauration, ... ;
- Les produits qui satisfont les besoins de luxe, non nécessaires ni à la vie, ni à la collectivité (exemple : parfums).

Il existe également une autre classification qui distingue les 3 catégories suivantes :

- Les biens industriels
- Les biens de consommation
- Les services

En ce qui concerne la démarche décisionnelle proposée, la nature du produit impacte fortement la pondération des critères. A titre d'exemple pour un produit de luxe, une importance particulière est accordée à la satisfaction du client contrairement au critère de coût. En l'occurrence la pondération de ces critères impacte fortement le choix de plan d'inspection.

- Stratégie de l'entreprise

Selon (Porter 1982) il s'agit de la réalisation des choix d'allocation de ressources disponibles et la fixation d'objectifs (financiers, humains, technologiques, etc.) qui engagent l'entreprise dans le long terme et la dotent d'un avantage concurrentiel durable, décisif et défendable. Ces choix sont déterminants en ce qui concerne le choix et la pondération des critères de la prise de décision.

2.2. Activités opérationnelles

Le point de vue opérationnel s'inscrit dans trois sous-activités qui sont assurées par la capitalisation et l'exploitation des connaissances de l'entreprise via les outils. Ces activités

nécessitent la fédération des expertises (concepteur, métrologues ...) et l'échange d'informations structurées mais hétérogènes. Le traitement des flux d'information à travers chacune des trois activités principales (prise de décision opérationnelle) est basé sur la définition de critères explicites et pertinents (prise de décisions stratégiques). En d'autres termes, les décisions opérationnelles sont des décisions techniques prises à l'aide d'outils, influencées par la définition de décisions stratégiques.

L'analyse de la pertinence des différents outils et approches de qualité, introduite précédemment, pour évaluer les critères pour chaque sous-activité opérationnelle, impose un regard en détail sur le flux d'information, les sous-critères, et les besoins en termes de fonctionnalités des outils. L'adaptation des critères globaux aux objectifs locaux de chaque sous-activité, met en évidence les sous-critères qui doivent être évalués par les outils intégrant la sous-activité en cours.

2.2.1. Identifier les caractéristiques-clefs à suivre/contrôler

Par cette sous-activité, les caractéristiques produit/processus/ressources sont analysées afin de quantifier l'impact de leurs variations sur le niveau de satisfaction de chacun des critères, et de les prioriser en termes de d'« importance » selon plusieurs critères à la fois. L'objectif final de cette sous-activité consiste à l'identification des caractéristiques clés (Key Characteristic) « KC ».

Elles sont les propriétés clés du produit, de la pièce et du processus de fabrication et des ressources qui affectent de manière significative le coût final, la performance ou la sécurité du produit lorsque le KCs diffère de leurs valeurs cibles (Thornton 1999). Les variations des caractéristiques clés sont interdépendantes. C'est-à-dire que, quel que soit le niveau des variables, ils existent des relations causales, pour cette activité en tant que contrôle, qui propagent les variations entre les fonctions de haut niveau et des paramètres de processus de bas niveau. Une dérive survenue au niveau du processus peut affecter le fonctionnement du produit. En même temps une défaillance au niveau du produit peut être due à une spécification non-satisfaite au niveau de la pièce. Une « Analyse multi-niveaux » est l'idée principale à retenir qui lie la génération de plan d'inspection du produit, de la pièce et du processus. Cette génération est initialisée par cette activité, ayant comme hypothèse que cette approche multi-niveaux devrait réduire les tâches d'inspection inutiles et garder seulement les plus rentables pour éviter la duplication des tâches et efforts.

En d'autres termes, cela réduit le nombre de KCs à contrôler/suivre et limite ainsi les tâches d'inspection à celles strictement nécessaires, tout en maintenant un certain niveau de qualité. Pour ce faire, l'idée est de relier les causes et les effets, grâce aux liens de causalité plus ou moins explicites. Cela dépend de la granularité ou la maturité des connaissances exprimées par les experts afin de procéder à une génération simultanée du plan de contrôle de conformité et celui du suivi de fabrication. Certains outils comme l'arbre de défaillances, et KC Flowdown peuvent améliorer le choix en éliminant encore certaines caractéristiques ou/et en choisissant le niveau d'inspection (produit, processus, ressource) optimal par une synthèse descendante ou une analyse ascendante.

Etant donnés la description du produit et du processus ainsi que des informations complémentaires, (comme les tolérances géométriques du produit et la dispersion des moyens de production en entrée), cette sous-activité tend à extraire les alternatives des KCs, identifiées par l'évaluation des critères pour chaque KC. En contrôle par exemple, un mode de défaillance potentielle, la performance réelle des moyens de production, et le coût engendré par une défaillance, mettent en évidence les points qui exigent une attention particulière vus les critères à évaluer. Ces derniers sont abordés selon l'objectif de la sous-activité courante :

- *Satisfaction du client* - critères qui peuvent prendre plusieurs formes comme la gravité de chaque caractéristique ou la hiérarchie des caractéristiques de même niveau (produit, pièce ou processus) ... Une échelle d'évaluation doit être définie. Cette notation vise à évaluer le risque de non-conformité pour le client ou l'utilisateur ... Ce risque ou la criticité de défaillance ainsi que l'impact sur le fonctionnement attendu du produit pourraient être estimés à l'aide des outils méthodologiques comme AMDEC, QFD, TAFT, Matrice d'impact et pourraient être appelés la gravité fonctionnelle.
- *Difficulté de réalisation* - ce critère est généralement traduit par la capabilité du processus à respecter les limites des tolérances prévues par le cahier des charges au niveau de la pièce ou celle du produit. La capabilité permet un choix objectif du niveau de qualité (ni trop, ni pas assez apte). Les indicateurs de capacité sont développés pour comparer la qualité de la production sur une période donnée, par rapport à l'objectif souhaité. Ce critère peut également être synonyme de la fréquence d'apparition de la défaillance de production ...
- *Coût* - ce critère est implicitement pris en compte dans les deux derniers critères, par exemple, en cotation de gravité (le coût de la défaillance externe, le coût de l'erreur) (Kunzmann et al. 2005). De nombreux travaux ont été réalisés dans le domaine de l'estimation des coûts, liés aux activités d'inspection qui peuvent être décomposés lors de cette activité en différents coûts : le coût de défaillance interne, le coût de production, le coût engendré par une non-détection ou une non-conformité constatée par le client …

Cette sous-activité nécessite l'analyse du produit pour identifier et classer les KCs impactant la satisfaction du client, du processus de fabrication pour identifier et classer les KCs, associées à une difficulté de réalisation élevée, et de coût inhérent à l'apparition éventuelle de défaillance. La définition de l'ensemble des flux d'information de cette sous-activité est proposée par la suite (Figure 41).

- Alertes issues du processus de conception du produit et de son processus de fabrication

Les points d'amélioration tout au long du processus de conception du produit mettent en évidence les caractéristiques dont l'évolution demande une bonne surveillance pour assurer la performance du système. Cela vient en aide notamment en première activité en tant que déclencheur pour l'identification des KCs à suivre ou à contrôler.

- Approche métier

Basées sur le regroupement des activités de l'entreprise en plusieurs métiers, de multiples approches sont nées permettant de déterminer toutes les compétences nécessaires dans l'ensemble de l'entreprise. La nécessité de communication entre ces unités et leur expertise sont souvent mises en avant. Dans notre cas il s'agit de contrôle de conformité et de suivi de fabrication dont l'intégration est proposée pour une meilleure prise de décision. L'expertise de ces approches est une ressource indispensable à l'élaboration d'un plan d'inspection.

- Connaissance des outils

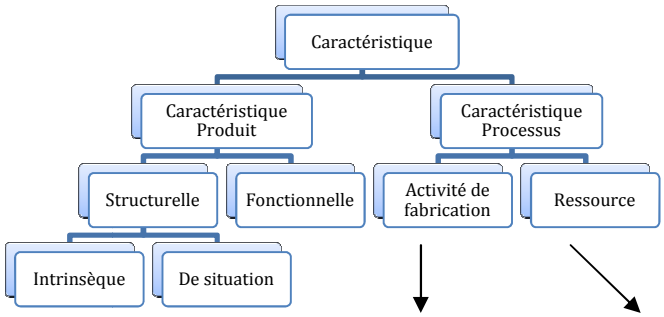
Rassemble le savoir faire des experts au sein de l'entreprise en ce qui concerne l'application des outils et méthodes, notamment de la maîtrise de la qualité et l'évaluation de la performance dans notre cas. La connaissance des experts mène à bien le déploiement des outils tels qu'AMDEC, qui intègrent les activités de la prise de décision telle que l'identification des KCs.

- Connaissance métier

Les informations acquises par expérience, l'historique ou d'autres sources de connaissance sur des aspects techniques, stratégiques ou commerciaux. Quels que soient l'intitulé et la façon dont cette connaissance est obtenue, elle se présente sur des fonctions générales ou des zones spécifiques en cours d'analyse. L'exactitude et l'exhaustivité de ces connaissances sont cruciales pour le développement de la base sur laquelle les améliorations peuvent être proposées et accomplies. Il peut être, par exemple, sous forme de consignes orales des experts sur des dérives très fréquentes sur une machine, ou sur l'incompatibilité d'un moyen de mesure avec certaines spécifications.

- Description du processus de fabrication (moyens/ressources de production, condition opératoire ...)

Elle comprend la gamme détaillée de fabrication, qui répertorie toutes les phases d'élaboration d'une pièce jusqu'à son stockage, ainsi que la description des ressources de fabrication ; des machines de fabrication et d'assemblage, d'outillage et des conditions de coupe, « material handling and transport », le coût et le temps des opérations de fabrication, les matériaux,… (Figure 42). L'élaboration d'un plan d'inspection optimal doit se faire au regard de ces données d'entrée pour éviter autant la sous-qualité que la sur-qualité, ainsi que des surcoûts associés.



		Paramètres de coupe		jauges théoriques	
Opération d'usinage	Outil	Vitesse	Avance	Longueur	Rayon
Alésage ébauche ∅ 39.7	Tête à aléser d'ébauche T10300	3185 tr/mn	478 mm/min	L theo : 130 L maxi : 129 L mini : 131	R theo : 20 R maxi : 19.5 R mini :20.5
Surfaçage ébauche cote de 16.2 ± 0.2	Fraise à surfacerT1104	3033 tr/mn	1213 mm/min	L theo : 133 L maxi : 134 L mini : 132	R theo : 62.5 R maxi :63 R mini : 62

Figure 42. Extrait de la gamme détaillée de la pièce C.A.I.

- Description structurelle/fonctionnelle du produit (fonctions techniques, spécification, ...)

Elle permet de caractériser les fonctions techniques décrites par les concepteurs et les besoins attendues par le client. La structure du produit, l'architecture de la chaîne fonctionnelle ainsi que le cahier des Charges Fonctionnel (CdCF) comprenant l'ensemble des graphes des fonctions pour chaque phase du produit, de la naissance jusqu'au recyclage doivent être fournis par le bureau d'étude. À la mise en œuvre de fonctions d'usage, un produit technique possède plusieurs composants qui ont chacun un rôle différent et complémentaire : elles remplissent chacune une fonction technique élémentaire. Une fonction principale peut être répartie en plusieurs fonctions élémentaires (action attendue d'un produit pour répondre à un élément du besoin). Ces données d'entrée sur des caractéristiques du produit et de ses composants sont indispensables notamment pour la première activité, l'identification des KCs, puisqu'elles font l'objet d'étude au cours de cette activité.

- Exigences produit

L'expression d'un besoin d'une façon formelle, auquel un produit devrait répondre. Elles peuvent être exprimées en entrée par la « Description structurelle/fonctionnelle du produit ». Cependant, pour la première activité de la génération de processus d'inspection elles peuvent être considérées comme déclencheur de la décision de choix des KCs à contrôler.

- Performance des moyens de production

L'aptitude des moyens de fabrication à garantir des objectifs et à satisfaire les spécifications du client. On parle souvent du coût et de la capabilité du processus à réaliser une caractéristique dans l'intervalle de tolérance fixé par le cahier des charges. Ces performances (si elles sont faibles) peuvent déclencher une décision concernant le choix des KCs à suivre. Pour les deuxième et troisième activités de la démarche, les

performances sont plutôt des contraintes qui limitent le choix des moyens et de la fréquence d'inspection.

- Méthodes de prise de décision

Il existe de multiples méthodes pour résoudre un problème de prise de décision. La prise de décision multicritères est l'identification et le choix des alternatives basés sur des objectifs et contraintes impliqués. Le but est de choisir l'alternative qui correspond le mieux aux objectifs. Le choix d'une méthode appropriée n'est pas une tâche facile et dépend du problème de décision, ainsi que des objectifs de décision. Ces méthodes sont particulièrement utilisées en troisième activité de la démarche où les alternatives sont entièrement développées et permet ainsi de choisir celle qui satisfait le mieux à un ensemble de critères.

- Relation causale

Dans notre domaine d'étude, elle lie deux entités : la cause et l'effet. Ce lien peut être seulement épistémique ou quantifié d'une manière statistique. Les liens de causalité sont au cœur de notre démarche décisionnelle. Cela guide et en même temps contraint le choix des caractéristiques clés et conduit aux activités d'inspection aux justes nécessaires, ni trop, ni trop peu.

- Retour d'expérience

Il peut être catégorisé sous le nom de connaissance métier. Il s'agit de l'enrichissement de la connaissance des experts suite aux pratiques de l'entreprise qui peut déclencher ou orienter une décision. Il assure souvent l'amélioration continue.

- Outils et modèles d'évaluation de la performance (maîtrise de qualité)

L'ensemble des approches, techniques et méthodes de la maîtrise de la qualité et l'évaluation de la performance offrent un choix important d'outils techniques aux experts non seulement pour la planification d'un plan optimal d'inspection mais aussi pour l'attribution d'une note de performance aux alternatives élaborées. Ces derniers sont indispensables pour des activités opérationnelles.

2.2.2. Identifier le mode/le moyen d'inspection approprié à chacune des KCs

L'objectif est d'identifier le mode d'inspection (contrôle de conformité/suivi de fabrication), les moyens d'inspection et les ressources associées, les plus appropriés pour chaque ensemble de KC, identifié lors de l'activité précédente basée sur l'ensemble des critères. Les sorties attendues sont les activités d'inspection et leurs ressources.

La seule entrée de cette sous-activité est la description des moyens d'inspection. Le choix est néanmoins restreint par les contraintes logistiques, par le souci de faisabilité, de disponibilité …, et est orienté par la performance des moyens d'inspection et le retour d'expérience.

Cette génération ou la sélection des activités et des ressources est entraînée par les critères suivants :

- *Satisfaction du client* - en comparaison avec la sous-activité précédente, ce critère est lié au risque de non-détection de la non-conformité des KC vus les moyens d'inspection sélectionnés (généralement interprété comme la difficulté de détection). Le risque de β, rentre en jeu en tant qu'indicateur de la performance d'inspection. Ce critère est affecté par l'incertitude de mesure/méthode d'inspection détaillée dans le GUM (Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure) (GUM 2008). Cela peut être pris en considération pour la prise de décision de la vérification de conformité, grâce à la formalisation de la norme DIN EN ISO 14253 (DIN/ISO 14253-1 2013). En ce qui concerne le choix des moyens d'inspection, le niveau acceptable de qualité ou le taux de non-conformité acceptable dépendent stratégiquement de l'entreprise.
- *Difficulté de réalisation* - ce critère est tel que mentionné précédemment, synonyme de non-détection de la difficulté de réalisation de la production, de la dérive du système de production ou de son décentrage. En général, elle est affectée par l'efficacité de la stratégie du suivi de fabrication (telle que le risque de deuxième espèce de cartes de contrôle) et l'incertitude des méthodes de mesure. QRC (Quality Risk Client) ou AQL (Acceptable Quality Level) sont couramment utilisés dans l'industrie. Autrement dit pour un plan d'inspection effectif, la capabilité dite composite de l'opération de processus et celle d'activité d'inspection doit assurer ce niveau acceptable de qualité. Une capabilité de processus jugée faible demande un moyen d'inspection précis et exact. L'analyse des risques inhérents au processus de fabrication peut être effectuée en appliquant les outils de type AMDEC Processus ou QFD III.
- *Coût* - ce critère a deux principaux sous-critères: le coût d'inspection (coût de mesure (Kunzmann et al. 2005), le coût inhérent au choix des activités et des ressources pour l'inspection) et le coût engendré par le risque de détection (coût d'erreur inhérent à des incertitudes comme le risque de fausse alarme α qui conduit aux coûts de mise au rebut et de refabrication alors qu'ils ne devraient pas être effectués). Le bénéfice apporté par l'inspection pourrait être estimé par des méthodes analytiques. Comme il a été discuté auparavant les méthodes analytiques de type ABC permettent d'intégrer les aspects (inducteurs) de la performance et donc la notion de qualité.

La nature des critères exigent ou imposent des outils appropriés pour tenir compte de la difficulté de détection de moyens d'inspection et de la capabilité du procédé de fabrication et d'inspection. D'une manière générale, les outils d'estimation des coûts sont également impliqués pour comparer des moyens d'inspection alternatifs étant donnés leurs risques et leurs incertitudes.

- Contraintes logistiques (faisabilité, disponibilité, cohérence)

Limites imposées concernant l'espace physique et d'autres contraintes (faisabilité, disponibilité, cohérence) comme les Planning policies[1]. Lors de la planification d'inspection, ces contraintes peuvent par exemple empêcher l'allocation d'un moyen d'inspection à une station donnée ou imposer une fréquence précise d'inspection.

- Description des moyens d'inspection

Pour la génération d'un plan d'inspection les moyens d'inspection disponibles doivent être répertoriés. La précision, l'exactitude et le coût de ceux-ci y sont associés.

- Performance des moyens d'inspection

L'efficacité ou l'aptitude à détecter les dérives du système, qui peut prendre plusieurs formes ou dimensions telles que le coût, le risque, la capabilité, l'incertitude, la précision, l'exactitude … Nous ne nous intéressons à celles-ci qu'à partir de la deuxième activité où la performance des moyens d'inspection (au regard des spécifications à contrôler/suivre) contraint leurs allocations.

2.2.3. Identifier la fréquence adaptée d'inspection et/ou les points d'insertion des tâches d'inspection

Suite à l'identification de KC et des modes d'inspection appropriés, la dernière sous-activité est liée à la planification des activités d'inspection. Basés sur la gamme de fabrication et la performance des méthodes d'inspection (coûts, risques, incertitudes, durée, et disponibilité ...), les points d'insertion des activités d'inspection dans la gamme sont proposés pour assurer un compromis entre la performance du processus de contrôle de conformité/suivi de fabrication et la productivité du système de production. La sortie de cette activité sont des alternatives du processus y compris les activités d'inspection. Idéalement ces alternatives de solution sont associées au niveau de la satisfaction des trois critères. Il est à noter qu'étant donnée la nature différente des critères, le jugement porté sur les solutions est difficile. L'agrégation de ces critères en une seule note d'adéquation de la solution peut compléter la génération de processus d'inspection.

L'entrée de cette activité qui fait l'objet de modifications est la gamme détaillée de fabrication où les activités d'inspection doivent être insérées. Parmi les contrôles nous pouvons notamment citer les contraintes logistiques (ex. contrainte de non-arrêt d'une machine pour effectuer l'inspection), le retour d'expérience, la performance des moyens de fabrication et celle des moyens d'inspection (ex. si l'arrêt d'une machine particulière à faible capabilité, nécessitant un contrôle, coûte cher à l'entreprise, dans le cas où elle est suivie par une opération non-coûteuse, le contrôle tardif peut être bénéfique).

[1] Planning Policies : Les règles métier par lesquelles l'organisation de la fabrication fait la planification de la production. Cela comprend la hiérarchisation des produits, les règles d'utilisation des installations, make-to-inventory/make-to-order et la sélection des stratégies de planification, par exemple Just-In-Time, Critical Inventory Reserve, etc

Les critères de cette sous-activité sont les suivants :

- *Satisfaction du client* - les critères sont les mêmes que la sous-activité précédente. Néanmoins la planification a beaucoup moins d'impact sur ce critère. Suite à une opération cruciale à la satisfaction du client, inhérente à une caractéristique clé, une méthode d'inspection au risque de non-détection β élevé, est déconseillée.
- *Difficulté de réalisation* - la planification des activités d'inspection a un impact sur ce critère, relatif à la détection d'une défaillance du système de production ou d'un décentrage, car elle a un effet sur le temps de détection et donc sur la réactivité de suivi du système de production. Un processus qui dérive régulièrement impose une activité d'inspection régulière.
- *Coût* - ce critère pour cette sous-activité comporte plusieurs sous-critères: la productivité du système de production (l'impact des activités d'inspection sur la productivité), le coût engendré par le maintient des produits non-conformes mais inaperçus dans la chaîne de production ...

Les outils nécessaires pour cette sous-activité sont majoritairement ceux de l'activité A02, axée sur l'évaluation de la performance globale et l'estimation des coûts de processus de fabrication et d'inspection. Une fois les alternatives établies, les méthodes de prise de décision peuvent être particulièrement utiles à cette activité pour faciliter le choix de la solution par l'attribution d'une note d'adéquation finale à chaque alternative.

La section suivante propose une synthèse de ce chapitre, et une conclusion qui aborde une vision transversale et confronte les chapitres 2, l'état de l'art, et le chapitre 3, le cadre méthodologique de la prise de décision pour la planification d'inspection.

3. Synthèse de l'état de l'art

Suivant la déclinaison organisationnelle de la qualité (Figure 43) proposée par (Marcotte 1995) la démarche décisionnelle proposée, indépendamment du domaine d'application, peut se situer plutôt au niveau tactique, mais intègre l'aspect stratégique par l'implication des critères ainsi que le niveau opérationnel via les outils. L'efficacité de la démarche dépend de l'élaboration des critères d'un point de vue stratégique et du choix des approches, méthodes et outils d'un point de vue opérationnel. Quels que soient les critères, l'outil, ou la méthode support, la tactique reste la même.

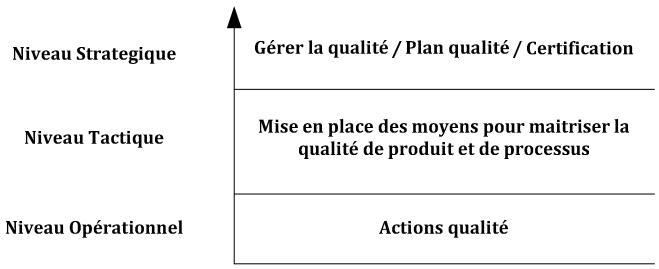


Figure 43. La déclinaison de la qualité aux différents niveaux structurels en entreprise

La nécessité d'une approche basée sur l'outil a été mise en évidence par la description des sous-activités avec un objectif multicritères. L'évaluation des critères dépend fortement de la façon dont nous faisons le choix des outils à chaque sous-activité. En

d'autres termes, une fois les critères définis, l'analyse des outils traditionnels pour chaque sous-activité permet d'identifier les outils les plus appropriés, capables d'évaluer ces critères.

À savoir que ce n'est pas seulement le choix des critères de la démarche que nous devons valider, mais aussi tous les éléments intervenants (flux d'informations nécessaires) lors de la prise de décision. L'objectif est de valider le rôle des entrées et les contrôles définis pour le processus décisionnel. Par ailleurs l'existence des informations n'appartenant pas à la démarche classique des outils, mais jugée nécessaire aux activités, engendre la modification des outils proposés. Autrement dit pour chaque **étape de la démarche décisionnelle** (A01, A02, A03), étant donné le flux d'informations et les objectifs proposés, la pertinence de l'approche pourrait être prouvée par une confrontation avec des **outils et approches existants**. Par un raisonnement inverse, nous mettons en évidence les insuffisances des outils classiques à compenser. **L'étape de la prise de décision** détermine les **critères d'évaluation** et les critères d'évaluation, demandent ou parfois imposent l'intervention de certains **outils ou méthodes**. La logique de ce raisonnement est résumée à la Figure 44.

L'analyse est abordée à travers les Tableau 12, Tableau 13, et Tableau 14. Par cette analyse des outils, deux questions générales sont à l'étude par les chapitres 2 et 3 :

- Est-ce que chaque élément d'entrée, de contrôle et critère définis pour la prise de décision à travers le modèle IDEF0 proposé, sont pris en compte grâce à des outils déjà existants ?
- Est-ce que chaque étape et chaque objectif, traités par les outils, apparaissent dans (est couvert par) la démarche décisionnelle ?

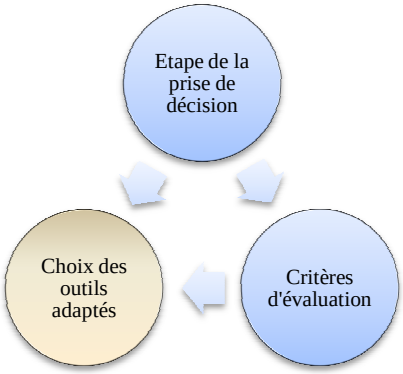


Figure 44. Récapitulatif de l'analyse des outils au regard du processus décisionnel

Il reste une question à traiter dans le chapitre 4 :

- Quel outil ou méthode doit-on choisir ?

Certains points sont conclus par cette analyse :

- Parfois il est possible d'associer chaque étape traitée par l'outil à une seule étape de la démarche décisionnelle mais souvent cette distinction n'est pas soulignée.

- La pondération des critères est l'un des éléments définis dans l'approche proposée qui n'est quasiment jamais traitée par les outils.
- Le critère de coût n'est jamais explicitement abordé (parfois implicitement appliqué par l'expert) alors qu'il est particulièrement nécessaire de le prendre en compte à travers les activités A02 et A03.
- Dans les tableaux qui suivent, nous remarquons que plus la prise de décision évolue à travers les étapes successives, moins d'outils sont impliqués (parmi les outils traditionnels existants).

A titre d'exemple, si nous regardons de plus près le Tableau 12, consacré à la première activité d'identification des KCs il y apparaît l'AMDEC processus. Cet outil pourrait intervenir afin d'identifier les paramètres les plus critiques du processus de fabrication. Pour cela en termes de données d'entrée la « Description du processus de fabrication (moyens/ressources de production, ...) » est certes nécessaire pour l'identification des causes de défaillance. Cependant la « Description structurelle/fonctionnelle du produit (fonctions techniques, spécification, ...) » est aussi indispensable puisque justement c'est à partir de celle-ci que les experts peuvent mener leur étude descendante du système jusqu'à l'identification des paramètres critiques du processus. Ces données sont effectivement des modes et des effets de la défaillance dans le tableau d'AMDEC. Pour assurer la pertinence de ces liens de causalité identifiés, les experts peuvent miser sur les « Alertes issues du processus de conception du produit et son processus de fabrication » et le « Retour d'expérience » définis comme des contrôles déclencheurs de l'activité.

À noter que contrairement à l'AMDEC classique où la détection, son efficacité, et les actions correctives sont toutes abordées en un seul tableau, la démarche proposée ne traite ces dernières qu'en deuxième et troisième activités. Ils n'apparaissent donc pas en Tableau 12 en ce qui concerne l'AMDEC processus. Cela permet de proposer des actions correctives par l'AMDEC classique, est bien sûr la notation des facteurs de risque. Les flux d'information qui rendent cette notation possible sont les « Performances des moyens de production » et le « Retour d'expérience », souvent d'une manière implicite.

Tableau 12. L'analyse de compatibilité des outils aux principes de la démarche proposée, A01

Etape de l'outil	Identifier les caractéristiques clefs liées au produit/processus/ressource à suivre/contrôler (A01)						
	Entrées		Contrôles				
	Description structurelle/fonctionnelle du produit (fonctions techniques, spécification, ...)	Descriptions du processus de fabrication (moyens/ressources de production, ...)	Pondération des critères	Alertes issues du processus de conception du produit et de son processus de fabrication	Retour d'expérience	Exigences produit	Performances des moyens de production
Matrice d'impact							
Analyse de la gravité associée à chaque caractéristique du produit	Description des FTE ainsi que des spécifications au niveau de la pièce	-	-	Alertes issus du processus de conception du produit	Permet la cotation de la gravité de la défaillance d'une manière implicite (contribution sur une fonctionnalité donnée)	Les besoins/FTE qui sont à respecter	-
Analyse de l'occurrence relative à chaque caractéristique du produit	Le classement de la gravité des caractéristiques	Descriptions du processus qui impactent sans doute l'occurrence des défaillances	-	Caractéristiques associées a une gravité élevée sont les déclencheurs	Permet la cotation de l'occurrence de la défaillance d'une manière implicite	Les besoins/FTE qui sont à respecter	Performance des moyens de production (ex. capabilité) a un fort impact sur l'occurrence de défaillance
Définition du plan de surveillance	-	-	-	-	-	-	-
Evaluation de la satisfaction client	Elle est calculée en fonction du : Niveau de satisfaction attendue sur la caractéristique finale en fonction des capabilités supposées sur les caractéristiques élémentaires Poids des FTEs Cette étape n'est pas explicitement décrite dans la démarche décisionnelle mais peut être ajoutée						
QFD I/II							
Identifier les Comment	Description des FTE ainsi que des spécifications au niveau de la pièce/du produit	-	-	Alertes issues du processus de conception du produit sur les impacts des caractéristiques sur les fonctions	Permet de juger implicitement la contribution des caractéristiques sur une fonctionnalité donnée	Les besoins/FTE sont à respecter	-
Identifier les relations entre Comment et Quoi	Description des FTE ainsi que des spécifications au niveau de la pièce/du produit	-	-	Alertes issues du processus de conception du produit sur les impacts des caractéristiques sur les fonctions	Permet de juger implicitement les relations causales	Les besoins/FTE sont à respecter	-
Hiérarchiser les Comment et Chiffrer les Comment en Combien	Description des FTE ainsi que des spécifications au niveau de la pièce/du produit	-	-	Alertes sur les conséquences les plus graves des défaillances au niveau de la pièce/du produit	Permet de chiffrer qualitativement les relations causales	Les besoins/FTE sont à respecter	-
Etudier les corrélations entre les Comment	Cette étape n'est pas explicitement décrite dans la démarche décisionnelle mais peut être ajoutée						
QFD III							
Identifier les Comment	Description des spécifications au niveau de la pièce	Descriptions du processus qui impactent sans doute l'apparition des défaillances	-	Alertes issues du processus de conception du produit sur les impacts des caractéristiques sur les fonctions	Permet de juger implicitement la contribution des paramètres de processus sur une spécification donnée	Les besoins/FTE sont à respecter	Performance des moyens de production impacte la réalisation des caractéristiques
Identifier les relations entre Comment et Quoi	Description des spécifications au niveau de la pièce	Descriptions du processus qui impactent sans doute l'apparition des défaillances	-	Alertes issues du processus de conception du produit sur les impacts des caractéristiques sur les fonctions	Permet de juger implicitement les relations causales	Les besoins/FTE sont à respecter	Performance des moyens de production impacte la réalisation des caractéristiques
Hiérarchiser les Comment et Chiffrer les Comment en Combien	Description des spécifications au niveau de la pièce	Descriptions du processus qui impactent sans doute l'apparition des défaillances	-	Alertes sur les conséquences les plus graves des défaillances au niveau de la pièce/du produit	Permet de chiffrer qualitativement les relations causales	Les besoins/FTE sont à respecter	Performance des moyens de production impacte la réalisation des caractéristiques
Etudier les corrélations entre les Comment	Cette étape n'est pas explicitement décrite dans la démarche décisionnelle mais peut être ajoutée						
AMDEC (l'ensemble de produit)							
Décomposition fonctionnelle produit/processus	Description des FTE de l'ensemble de produit	-	-	Alertes issues des fonctions les plus pertinentes	Permet de juger implicitement les relations causales	Les besoins/FTE sont à respecter	-
Modes de défaillance potentielle	Description de l'assemblage du produit	-	-	Alertes issues des modes de défaillances	Permet de juger implicitement les relations causales	Les besoins/FTE sont à respecter	-
Les effets potentiels des modes de défaillance (sur la pièce, l'ensemble, l'utilisateur)	Description des fonctions attendues de l'ensemble du produit par le client	-	-	Alertes sur les conséquences les plus grave des défaillances au niveau du produit	Permet de juger implicitement les relations causales	Les besoins/FTE sont à respecter	-
Les causes	Description des FTE au niveau de la pièce	-	-	Alertes sur les défaillances au niveau de la pièce générant des effets au niveau du produit	Permet de juger implicitement les relations causales	Les besoins/FTE sont à respecter	-

Etape de l'outil	Identifier les caractéristiques clefs liées au produit/processus/ressource à suivre/contrôler (A01)						
	Entrées		Contrôles				
	Description structurelle/fonctionnelle du produit (fonctions techniques, spécification, ...)	Descriptions du processus de fabrication (moyens/ressources de production, ...)	Pondération des critères	Alertes issues du processus de conception du produit et de son processus de fabrication	Retour d'expérience	Exigences produit	Performances des moyens de production
La détection	-	-	-	-	-	-	-
F/D/G	-	-	-	-	Implicitement sur des notations	Appréciation des exigences impact sur la gravité de la défaillance	-
Les actions proposées éliminant les modes de défaillance ou modifiant les effets.	-	-	-	-	-	-	-
AMDEC (pièce)							
Décomposition fonctionnelle produit/processus	Description des FTE au niveau de la pièce	-	-	Alertes issues des fonctions les plus pertinentes	Permet de juger implicitement les relations causales	-	-
Modes de défaillance potentielle	Description des FTE	-	-	Alertes issues des modes de défaillances	Permet de juger implicitement les relations causales	-	-
Les effets potentiels des modes de défaillance (sur la pièce, l'ensemble, l'utilisateur)	Description des fonctions attendues de la pièce par le client	-	-	Alertes sur les conséquences les plus grave des défaillances	Permet de juger implicitement les relations causales	-	-
Les causes	Description des spécifications au niveau de la pièce	-	-	Alertes issues des défaillances au niveau de la pièce générant les effets sur les fonctions	Permet de juger implicitement les relations causales	-	-
La détection	-	-	-	-	-	-	-
F/D/G	-	-	-	-	Implicitement sur des notations	Appréciation des exigences impact sur la gravité de la défaillance	-
Les actions proposées éliminant les modes de défaillance ou modifiant les effets.	-	-	-	-	-	-	-
AMDEC (processus)							
Décomposition fonctionnelle produit/processus	Description des FTE au niveau de la pièce	-	-	Alertes issues des caractéristiques les plus pertinentes	Permet de juger implicitement les relations causales	-	-
Modes de défaillance potentielle	Description des FTE	-	-	Alertes issues des modes de défaillances	Permet de juger implicitement les relations causales	-	-
Les effets potentiels des modes de défaillance (sur la pièce, l'ensemble, l'utilisateur)	Description des fonctions attendues de la pièce par le client	-	-	Alertes sur les conséquences les plus grave des défaillances des caractéristiques	Permet de juger implicitement les relations causales	-	-
Les causes	Description des spécifications au niveau de la pièce	Description du processus qui impacte sans doute l'apparition des défaillances	-	Alertes issues du processus de fabrication	Permet de juger implicitement les relations causales	-	-
La détection	-	-	-	-	-	-	-
F/D/G	-	-	-	-	Implicitement sur des notations	-	Performance des moyens de production (ex. capabilité) a un fort impact sur l'occurrence de défaillance
Les actions proposées éliminant les modes de défaillance ou modifiant les effets.	-	-	-	-	-	-	-
KC Flowdown							
Déchiffrer les relations causales besoin-fonction	Description des fonctions au niveau du produit	-	-	Alertes issues des fonctions attendues	…	Les besoins/ fonctions sont à respecter	-
Déchiffrer les relations causales fonction-caractéristique	Description des FTE	-	-	Alertes issues des caractéristiques plus pertinentes	…	Les besoins/ fonctions sont à respecter	-

Etape de l'outil	Identifier les caractéristiques clefs liées au produit/processus/ressource à suivre/contrôler (A01)						
	Entrées		Contrôles				
	Description structurelle/fonctionnelle du produit (fonctions techniques, spécification, ...)	Descriptions du processus de fabrication (moyens/ressources de production, ...)	Pondération des critères	Alertes issues du processus de conception du produit et de son processus de fabrication	Retour d'expérience	Exigences produit	Performances des moyens de production
Déchiffrer les relations causales caractéristique-élément de processus	-	Description des éléments du processus	-	Alertes sur les éléments du processus et leurs conséquences	…	-	-
Déchiffrer les relations causales élément de processus-dispersion des moyens de production	-	Description détaillée des moyens de production	-	Alertes issues des moyens de productions	…	-	-
Etude de capabilité							
Comparer les performances souhaitées par rapport aux performances réelles	Description détaillée des spécifications au niveau de la pièce	Descriptions détaillée des moyens de production	-	Alertes issues des fonctions attendues	…	-	Performance des moyens de production contrainte à la réalisation des caractéristiques
TAFT							
Décomposition fonctionnelle produit	Description détaillée des fonctions attendues au niveau de la pièce	-	-	Alertes issues des fonctions attendues	…	Les besoins/ fonctions qui sont à respecter	-
Identifier les relations entre fonctions/structure du produit	Description de l'ensemble du produit	-	-	Alertes issues des fonctions attendues/du produit/de la pièce	…	-	-
Modes de défaillance potentielle	Description des FTE/spécifications de la pièce	-	-	Alertes issues des fonctions attendues/du produit/de la pièce	…	Les besoins/ fonctions qui sont à respecter	-
Gravité de la défaillance	Description des FTE	-	-	Alertes issues des fonctions attendues/du produit/de la pièce	…	Les besoins/ fonctions qui sont à respecter	-
Les causes au niveau de la pièce	Description des spécifications au niveau de la pièce	-	-	Alertes issues du produit/de la pièce	…	-	-
Transmettre la gravité des fonctions aux causes	Description des relations causales	-	-	Alertes issues des fonctions attendues/du produit/de la pièce	…	Les besoins/ fonctions qui sont à respecter	-

Tableau 13. L'analyse de compatibilité des outils aux principes de la démarche proposée, A02

Etape de l'outil	Identifier le mode/le moyen d'inspection approprié a chacune des KCs (A02)					
	Entrées		Contrôles			
	Les alternatifs des KCs aux différents niveaux	Description des moyens de contrôle	Pondération des critères	Retour d'expérience	Performance des moyens de contrôle (coût, risque, incertitude, ...)	Contraintes logistiques (faisabilité, disponibilité, cohérence)
Matrice d'impact						
Analyse de la gravité associée à chaque caractéristique du produit	-	-	-	-	-	-
Analyse de l'occurrence relative à chaque caractéristique du produit	-	-	-	-	-	-
Définition du plan de surveillance	Besoin de savoir les KCs les plus pertinentes à contrôler	Description des moyens de contrôle qui sont des éléments à traiter lors de l'activité pour en choisir certains	-	Explicitement par l'expert	La performance des moyens de contrôle contrainte par rapport à la satisfaction du client souhaitée	ex. faisabilité de réalisation d'un contrôle concernant une spécification
Evaluation de la satisfaction client	Elle est calculée en fonction du : Niveau de satisfaction attendue sur la caractéristique finale en fonction des capabilités supposées sur les caractéristiques élémentaires Poids des FTEs Cette étape n'est pas explicitement décrite dans la démarche décisionnelle mais peut être ajoutée					
AMDEC (l'ensemble de produit)						
Décomposition fonctionnelle produit/processus	-	-	-	-	-	-
Modes de défaillance potentielle	-	-	-	-	-	-
Les effets potentiels des modes de défaillance (sur la pièce, l'ensemble, l'utilisateur)	-	-	-	-	-	-

Etape de l'outil	Identifier le mode/le moyen d'inspection approprié a chacune des KCs (A02)					
	Entrées		Contrôles			
	Les alternatifs des KCs aux différents niveaux	Description des moyens de contrôle	Pondération des critères	Retour d'expérience	Performance des moyens de contrôle (coût, risque, incertitude, ...)	Contraintes logistiques (faisabilité, disponibilité, cohérence)
Les causes	-	-	-	-	-	-
La détection	Besoin de savoir les KCs les plus pertinentes à contrôler	Description des moyens de contrôle aide lors de l'activité pour en choisir certains avec les détections compatibles	-	Difficulté de détection qui est appliquée (plutôt explicitement) par l'expert	La performance des moyens de contrôle contrainte par rapport à la satisfaction du client souhaitée	ex. faisabilité de réalisation d'un contrôle concernant une spécification
F/D/G	Besoin de savoir les KCs les plus pertinentes à contrôler	-	-	L'avis de l'expert sur la gravité/fréquence des défaillances		-
Les actions proposées éliminant les modes de défaillance ou modifiant les effets.	Besoin de savoir les KCs plus pertinentes à contrôler	Description des moyens de contrôle aide lors de l'activité pour en choisir certains avec les détections compatibles	-	La compatibilité des modes de contrôles	La performance des moyens de contrôle contrainte par rapport à la satisfaction du client souhaitée	ex. faisabilité de réalisation d'un contrôle concernant une spécification
AMDEC (niveau de la pièce)						
Décomposition fonctionnelle produit/processus	-	-	-	-	-	-
Modes de défaillance potentielle	-	-	-	-	-	-
Les effets potentiels des modes de défaillance (sur la pièce, l'ensemble, l'utilisateur)	-	-	-	-	-	-
Les causes	-	-	-	-	-	-
La détection	Besoin de savoir les KCs les plus pertinentes à contrôler	Description des moyens de contrôle aide lors de l'activité pour en choisir certains avec les détections compatibles	-	Difficulté de détection est appliquée (plutôt explicitement) par l'expert	La performance des moyens de contrôle contrainte par rapport à la satisfaction du client souhaitée	ex. faisabilité de réalisation d'un contrôle concernant une spécification
F/D/G	Besoin de savoir les KCs plus pertinentes à contrôler	-	-	L'avis de l'expert sur la gravité/fréquence des défaillances		-
Les actions proposées éliminant les modes de défaillance ou modifiant les effets.	Besoin de savoir les KCs plus pertinentes à contrôler	Description des moyens de contrôle aide lors de l'activité pour en choisir certains avec les détections compatibles	-	La compatibilité des modes de contrôles	La performance des moyens de contrôle contrainte par rapport à la satisfaction du client souhaitée	ex. faisabilité de réalisation d'un contrôle concernant une spécification
Etude de capabilité						
Comparer les performances souhaitées par rapport aux performances réelles	Besoin de savoir les KCs plus pertinentes à contrôler afin de choisir les moyens les plus aptes	Description des moyens de contrôle aide lors de l'activité pour en choisir certains	-	Choix des indicateurs de capabilité compatibles	La performance des moyens de contrôle nous indique les dispersions	ex. non-cohérence d'un indicateur concernant une spécification

Tableau 14. L'analyse de compatibilité des outils aux principes de la démarche proposée, A03

Etape de l'outil	Attribuer la fréquence d'inspection adaptée aux KCs/Identifier les points d'insertion des activités d'inspection (A03)						
	Entrées		Contrôles				
	Les alternatifs des KCs-mode de contrôle	Descriptions du processus de fabrication (moyens/ressources de production, ...)	Pondération des critères	Retour d'expérience	Performances des moyens de production	Performance des moyens de contrôle (coût, risque, incertitude, ...)	Contraintes logistiques (faisabilité, disponibilité, cohérence)
Matrice d'impact							
Analyse de la gravité associée à chaque caractéristique du produit	-	-	-	-		-	-
Analyse de l'occurrence relative à chaque caractéristique du produit	-	-	-	-		-	-
Définition du plan de surveillance	Besoin de savoir les modes de contrôles compatibles afin de contrôler les KCs les plus pertinentes	Description des moyens de production et le séquencement des opérations	-	Explicitement par l'expert	La performance des moyens de production contrainte sur le choix des moyens de contrôle	La performance des moyens de contrôle contrainte par rapport à la satisfaction du client souhaitée	ex. faisabilité de réalisation (insertion) d'un contrôle suite à une opération donnée
Evaluation de la satisfaction client	Elle est calculée en fonction du : Niveau de satisfaction attendue sur la caractéristique finale en fonction des capabilités supposées sur les caractéristiques élémentaires Poids des FTEs Cette étape n'est pas explicitement décrite dans la démarche décisionnelle mais peut être ajoutée						
AMDEC (processus)							
Décomposition fonctionnelle produit/processus	-	-	-	Permet de juger implicitement les relations causales	-	-	-

Etape de l'outil	Attribuer la fréquence d'inspection adaptée aux KCs/Identifier les points d'insertion des activités d'inspection (A03)						
	Entrées		Contrôles				
	Les alternatifs des KCs-mode de contrôle	Descriptions du processus de fabrication (moyens/ressources de production, ...)	Pondération des critères	Retour d'expérience	Performances des moyens de production	Performance des moyens de contrôle (coût, risque, incertitude, ...)	Contraintes logistiques (faisabilité, disponibilité, cohérence)
Modes de défaillance potentielle	-	-	-	Permet de juger implicitement les relations causales	-	-	-
Les effets potentiels des modes de défaillance (sur la pièce, l'ensemble, l'utilisateur)	-	-	-	Permet de juger implicitement les relations causales	-	-	-
Les causes	-	-	-	Permet de juger implicitement les relations causales	-	-	-
La détection	-	-	-	-	-	-	-
F/D/G	-	Moyen de production qui impacte la fréquence d'apparition des défaillances	-	Implicitement sur des notations	Performance des moyens de production (ex. capabilité) a un fort impact sur l'occurrence de défaillance et donc la fréquence de contrôle nécessaire	-	ex. faisabilité de réalisation d'un contrôle concernant une spécification
Les actions proposées éliminant les modes de défaillance ou modifiant les effets.	Besoin de connaitre les KCs les plus pertinentes et les modes de contrôle compatible afin de pouvoir associer les fréquences	Besoin de connaitre les moyens de production réalisant chacune des KCs	-	…	Moyen de production, qui impacte la fréquence de contrôle nécessaire	Performance de contrôle impacte sa fréquence ainsi que le choix du mode de contrôle et son point d'insertion	ex. faisabilité de réalisation d'un contrôle concernant une spécification
Etude de capabilité							
Comparer les performances souhaitées par rapport aux performances réelles	Besoin de connaitre les KCs les plus pertinentes et les modes de contrôle compatible afin de pouvoir associer les fréquences	Besoin de connaitre les moyen de production réalisant chacune des KCs ainsi que le séquencement des opérations afin d'insérer les tâches de contrôles	-	…	Assurer la performance souhaitée de production en choisissant la fréquence adéquate	Performance souhaitée d'inspection	…

La Figure 45 (extraire de la Figure 1) présente le cheminement suivi par les trois premiers chapitres, et la vision qui croise les chapitres 2 et 3 (la boucle) pour un meilleur choix d'outils inhérent à chaque activité de la prise de décision.

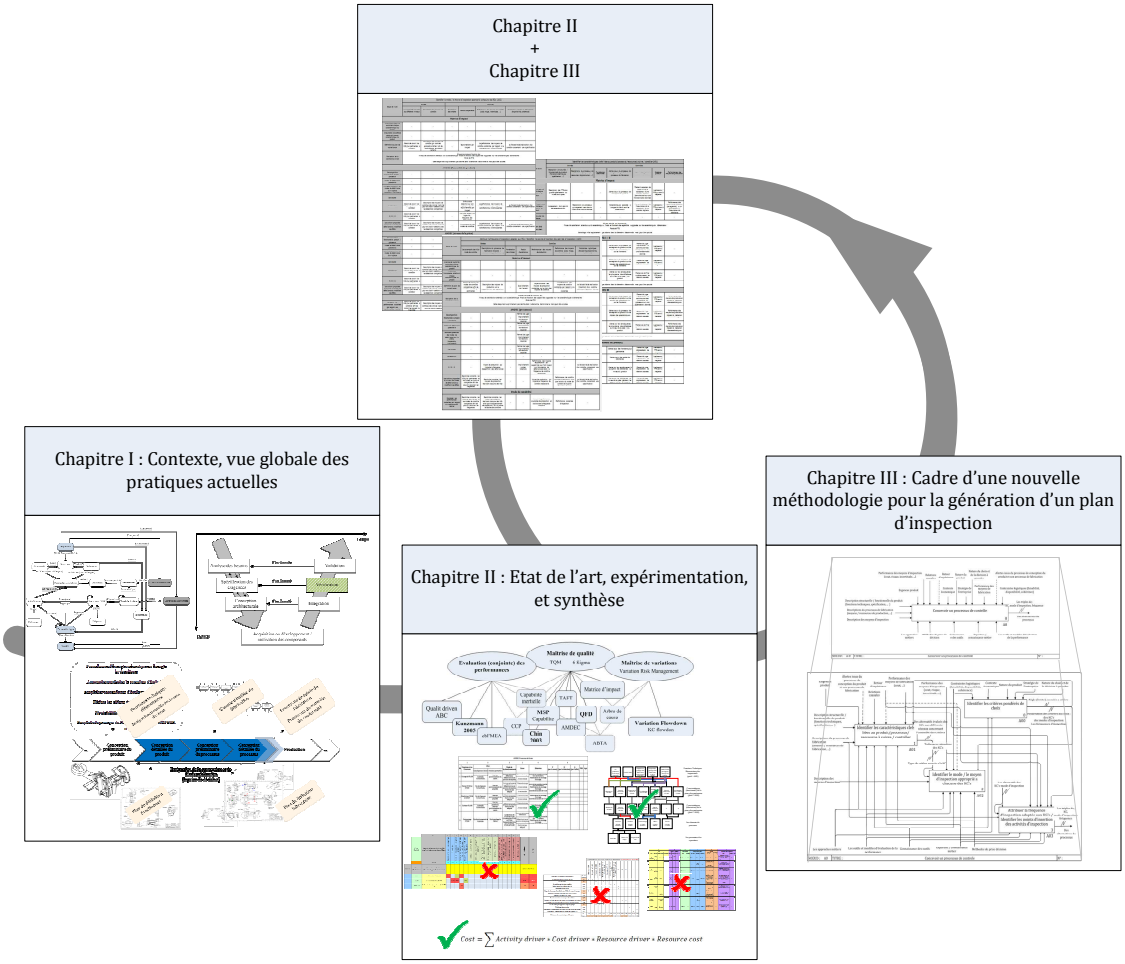


Figure 45. L'évolution de la proposition

L'objectif à travers le chapitre suivant est une investigation sur l'adaptabilité et la complémentarité des outils existants, et leurs capacités d'intégration dans une méthode unificatrice introduite lors de l'analyse de l'état de l'art, et à contribuer ainsi à la proposition d'un outil, si nécessaire, pour compenser les inconvénients des outils traditionnels. Pour ce faire, une attention particulière est portée à la sous-activité A01 : identification des caractéristiques clés à suivre/contrôler, puisque la décision prise lors de cette activité nous semble la plus subjective. La criticité des caractéristiques est très souvent basée sur le jugement porté par l'expert dans la structure des outils et méthodes de qualité de l'activité A01. Cependant les activités A02 et A03 traitent notamment de l'estimation objective du coût et de la performance. Le chapitre 4 est donc en grande partie consacré à l'activité A01, il propose aussi un modèle d'estimation de coût de la qualité pour les activités A02 et A03, et ouvre une perspective pour une meilleure prise de décision lors de l'activité A03.

Chapitre IV – Outils et modèles d'évaluation des critères de la planification d'inspection

Ce chapitre est décomposé en trois parties selon les trois activités définies par la démarche de prise de décision et leurs besoins en terme d'outils. Premièrement, il propose une analyse critique des outils existants, potentiellement aptes à intégrer l'activité A01. Elle est suivie par une synthèse approfondie des outils retenus suite à la confrontation des outils de l'état de l'art avec les besoins du cadre pour la génération du plan d'inspection élaboré. Cette synthèse met en avant des points d'amélioration des outils, et débouche sur des modifications à leur apporter pour la première activité A01. Ce chapitre propose également un modèle générique d'évaluation des critères qui remplit notamment les attentes de l'activité A02, mais aussi en partie celles de l'activité A03. De nouveaux outils et modèles d'évaluation des critères proposés sont dotés des mêmes finalités que les activités de la démarche décisionnelle pour pouvoir s'ajuster au mieux aux besoins. Ces outils ou modèles sélectionnés, élaborés pour chaque activité sont détaillés et les applications sont illustrées sur des cas d'études. Et enfin l'activité A03 est vue à la fin de ce chapitre comme une perspective de ce travail. Nous nous focalisons notamment sur la première activité, identification des KCs, supposée être la plus subjective des trois, vue la nature de ses estimations.

L'approche globale de la prise de décision incluant la définition des activités, impose certaines conditions et limites auxquelles nous souhaitons répondre par des outils. Après une courte revue des lignes directrices de chaque activité et les critères qui doivent être abordés, les principaux outils retenus de l'état de l'art font l'objet d'une critique en fonction de leur capacité à évaluer ces critères. L'analyse de l'état de l'art retient parmi les outils ceux qui :

- Sont adaptables et opérationnels au regard des activités
- Les plus souvent utilisés et admis par les industriels

1. Identification des caractéristiques clés

Afin d'identifier les KCs au niveau du produit, du processus, et des ressources, il est nécessaire d'évaluer les critères suivants pour toutes les caractéristiques : impact sur la satisfaction du client, et la difficulté de réalisation. A savoir que le raisonnement de cette activité se base sur le fait que la performance du procédé est évaluée par les :

- Fonctions caractérisant le produit
- Spécifications attachées aux composants
- Paramètres décrivant le processus et les ressources

Le critère de coût sera examiné au cours des activités A02 et A03, dès 0lors que l'on s'intéresse plus particulièrement aux modes, aux ressources, et à la fréquence d'inspection. Il est à noter qu'en tout cas, même lors de l'activité A01, il est indirectement pris en compte par les experts notamment à travers la cotation des facteurs comme la gravité, l'importance, … grâce à leurs expériences sur les coûts engendrés par une défaillance interne ou externe à l'entreprise.

A présent, nous regardons de plus près la contribution éventuelle des outils à l'évaluation des critères souhaités et la possibilité d'effectuer cette évaluation aux niveaux souhaités.

1.1. L'analyse critique des outils existants

Les Tableaux 15 et 16 réunissent les outils qui contribuent à l'évaluation de la criticité des spécifications et des paramètres, qui exploitent les liens de causalité, et qui sont même souvent destinés à la priorisation des exigences. Compte tenu des exigences décrites dans l'état de l'art, ces tableaux résument les questions suivantes :

- Quels sont les critères, identifiés, évalués par l'outil ?
  - A travers quels facteurs et sur quelle échelle sont-ils évalués ?
- A quels niveaux sont ils évalués ?
  - Quels sont les niveaux dont les informations sont requises pour l'estimation de la criticité ?

Tableau 15. Analyse des outils au regard des critères

Outils	**Critères (Activité A01)**		
	Satisfaction du client	***Difficulté de réalisation***	***Coût***
TAFT	Gravité de la défaillance associée à chaque spécification pièce Echelle ordinale Estimation faite par l'expert	-	-
AMDEC Produit	Gravité de la défaillance associée à chaque fonction Echelle ordinale Estimation faite par l'expert	Occurrence de la défaillance Echelle ordinale Estimation faite par l'expert	-
AMDEC Processus	Gravité de la défaillance associée à chaque activité du processus ayant un effet sur la satisfaction du client Echelle ordinale Estimation faite par l'expert	Occurrence de la défaillance Echelle ordinale Estimation faite par l'expert	-
QFD I/II	Grille d'importance des fonctions et des caractéristiques pièces Echelle ordinale Estimation faite par l'expert et propagée au niveau inférieur	-	Grille comparative des solutions par rapport à la concurrence Echelle ordinale Estimation faite par l'expert
QFD III	Grille d'importance des caractéristiques pièces et processus Echelle ordinale Estimation faite par l'expert et propagée au niveau inférieur	Capabilités Echelle cardinale Estimation numérique	-
Etude des Capabilités	Intervalles de tolérance	Décentrage et dispersion	-
Capabilité inertielle	Intervalle**s** de tolérance	Décentrage et dispersion	Indirectement par le tolérancement inertiel basé sur la fonction de perte de Tagauchi
CCP	Intervalles de tolérance	Décentrage et dispersion	-
KC Flowdown	Pondérations des exigences & spécifications Echelle cardinale Estimation faite par une analyse de sensibilité.	Qualitative Echelle cardinale Estimation numérique	-
Matrice d'impact	Grille d'importance des fonctions, et niveau de sensibilité des fonctions par rapports aux caractéristiques Echelle ordinale Estimation faite par l'expert ou simulation	Capabilités	Implicitement par les experts lors de choix des modes de surveillance Le coût engendré par la défaillance pour l'identification des KCs n'est pas pris en compte
Rough-cut process planning for quality	Grille d'importance des fonctions et des caractéristiques pièces Gravité de la défaillance associée à chaque activité du processus ayant un effet sur la satisfaction du client Echelle ordinale Estimation faite par l'expert	Echelle cardinale Estimation numérique	-
CbFMEA	Gravité de la défaillance associée à chaque fonction Echelle ordinale	Occurrence de la défaillance Echelle ordinale Estimation faite par l'expert	Estimation du coût de risque de défaillance
Arbre des causes	Occurrence des défaillances et risques	-	-

Tableau 16. Capacité d'identification des caractéristiques aux multiples niveaux par les outils

Outils	Caractéristiques aux multiples niveaux		
	Produit/Fonction	*Pièce*	*Processus/Ressources*
TAFT (PROCAR)	I	E	
AMDEC Produit	I/E	E	
AMDEC Processus		I/E	E
QFD I/II	I/E	E	
QFD III		I/E	E
Etude de capabilité		I	I/E
Capabilité inertielle		I	I/E
CCP	I	I	I/E
KC Flowdown	I/E	I/E	I/E
Matrice d'impact	I	E	E
Rough-cut process planning for quality	I/E	I	I/E
CbFMEA		I/E	E
Arbre des causes	I/E	I/E	I

I: Information / E: Evaluation

En synthèse de cette analyse des outils de « l'identification des exigences », nous remarquons que principalement deux stratégies d'évaluation se dégagent :

La première, est une stratégie pessimiste (TAFT, AMDEC) ou l'expert cote une fonction, une spécification, ou une opération de fabrication à partir de l'impact de sa défaillance relative à la satisfaction du client en évaluant la gravité de celle-ci sur une échelle ordinale. Nous pouvons parler ici de risque de non qualité ou d'une **stratégie orientée problème.**

La deuxième, est une stratégie optimiste (QFD, Matrice d'impact, KC Flowdown) ou l'expert cote une fonction, une spécification ou un paramètre de processus en fonction de la désirabilité ou la préférence du client, comme une **stratégie orientée solution.**

La majorité des évaluations de la « satisfaction du client » sont basées sur une échelle ordinale. La quantification de l'importance (la stratégie optimiste) ou la gravité (la stratégie pessimiste) est subjective ; elle est basée sur le niveau de maturité de la connaissance de l'expert ou de l'évaluateur.

De plus, **l'évaluation de l'importance ou de la gravité est généralement dite locale**, c'est-à-dire, l'évaluation d'une caractéristique est réalisée indépendamment des évaluations faites à d'autres niveaux. Même si l'outil est capable d'effectuer l'évaluation à de multiples niveaux, la procédure d'évaluation doit être itérée à chaque niveau sans tenir compte explicitement des évaluations aux autres niveaux, à l'exception de la matrice d'impact et du QFD qui proposent une analyse de sensibilité entre les niveaux.

En outre en ce qui concerne le critère de la « difficulté de réalisation », nous constatons deux types d'évaluation :

La première, est une prise en compte purement qualitative (AMDEC) qui se concentre sur la **fréquence d'apparition des défaillances** (la fréquence d'apparition d'un échec est due à la capabilité des moyens de production pour assurer la qualité du produit).

La deuxième, est une évaluation quantitative (Matrice d'impact, Etude de capabilité), par les **tolérances attribuées et en mettant l'accent sur la variabilité des moyens de fabrication** pour l'estimation de la capabilité.

L'estimation quantitative offre certes, une précision considérable, mais est parfois contraignante en termes de données, de dispersion et de décentrage à court terme ou à long terme, nécessaires à l'évaluation de multiples indicateurs. Le choix même de l'indicateur représentatif de l'état du système peut être problématique. Par ailleurs, une prise de décision ne nécessite pas forcément une évaluation quantitative. Un jugement qualitatif de l'aptitude du processus pourrait largement suffire à la prise décision.

Pour le critère de « coût », on note qu'à part CbFMEA d'une manière quantitative, et la matrice d'impact et le QFD d'une manière implicite, les autres outils ne permettent pas une évaluation explicite de ce critère. Cela confirme le choix fait sur la dissociation des activités de prise de décision : l'identification des exigences (A01), où le coût n'entraîne aucun impact sur la décision, et l'évaluation de la performance (A02 et A03). Pour la première étape l'activité A01, l'évaluation de coût n'est pas vitale. Elle peut même mener a une non-sélection non-souhaitée de KC. En revanche, pour les deux activités suivantes, les outils d'estimation de coût auront beaucoup de pertinence. En d'autres termes le critère de coût intervient seulement après la première sous-activité A01.

Comme le montre le Tableau 15, la plupart des outils ne sont pas en mesure d'évaluer en même temps les trois critères de satisfaction du client, de difficulté de réalisation, et de coût. En outre, quelque soit les critères, l'interdépendance des fonctions et caractéristiques de haut niveau et les paramètres de processus de bas niveau ne sont pas souvent cartographiés et exploités. Les outils n'évaluent pas l'impact de la maîtrise d'une caractéristique, sur la valeur d'autres critères que celui qui a entraîné ce choix de la caractéristique à maîtriser. Cette affirmation est cruciale au regard de notre objectif principal : l'inspection au juste nécessaire. A titre d'exemple le suivi de fabrication d'un paramètre, devrait permettre de réduire la variabilité à long terme au niveau des pièces ou des caractéristiques du produit et donc d'éliminer une tâche de contrôle de conformité.

L'**AMDEC** se démarque des autres outils pour de multiples raisons. Premièrement, il offre une structure adaptée et une capacité à réaliser une agrégation de plusieurs critères pour la prise de décision. Deuxièmement, la « non-précision » des estimations peut être bénéfique puisqu'on ne se situe qu'à la première activité de la prise de décision. Autrement dit l'estimation qualitative est suffisante à ce stade. Les estimations numériques viendront par la suite dès lors que la décision se montrera moins subjective. Troisièmement, comme nous parlons de plan d'inspection exigeant plus de vigilance, une vision pessimiste comme celle d'AMDEC semble plus adaptée. Il est également considéré

comme un outil répandu dans les industries, facile à mettre en œuvre et flexible à tout contexte.

Pour compléter cette analyse critique, le Tableau 16 résume les capacités potentielles des outils à prendre en compte les interdépendances entre les caractéristiques des différents niveaux. Cette analyse montre que la majorité des outils ou méthodes sont pertinents pour soit la planification de contrôle de conformité (évaluation de la performance au niveau du produit ou de la pièce) soit la planification de la surveillance (évaluation de la performance au niveau du processus), mis à part **KC Flowdown**. Cet outil peut fournir une vision globale du problème afin d'envisager une co-conception de plan de contrôle de conformité du produit et de suivi de fabrication du processus. La prise en compte de ces corrélations dans la démarche de décision part de l'hypothèse de départ ; la possibilité d'avoir de l'inspection au niveau produit, pièce, processus, ressource, …

Les outils retenus ont leurs objectifs individuels pour lesquels ils sont le plus souvent sollicités : AMDEC, c'est d'identifier les risques les plus élevés du système pour la proposition des actions correctives, et KC Flowdown, de fournir une vision globale sur la propagation, bottom-up ou top-down, des risques. La nécessité d'une prise de décision multicritères motive le choix d'AMDEC, tandis que la nécessité d'une évaluation multi-niveaux nous incite à choisir le KC Flowdown. Ainsi l'usage commun d'AMDEC et la structure arborescente de KC Flowdown rendent ces outils, facile à percevoir. Néanmoins il est à noter que, contrairement à l'usage habituel des outils, le contexte dans lequel nous positionnons cette étude, est la planification d'inspection à travers un processus de prise de décision consécutive. Cela démontre la nécessité d'apporter certaines modifications à ces outils et de les adapter au contexte de ce travail : la planification d'inspection. Ce choix de développement d'une nouvelle structure d'outil nous conduit à mener une étude sur les points d'amélioration des outils retenus de la littérature.

Par la section suivante, les principaux axes sur lesquels le développement de l'outil est fondé, sont mis en évidence. Comme détaillé précédemment, l'objectif est de prioriser les caractéristiques et paramètres, ayant un impact significatif sur les fonctionnalités du produit et/ou étant difficiles à respecter. Selon cet objectif, l'adaptabilité des outils, AMDEC et KC Flowdown à la prise de décision proposée pour la planification d'inspections, est critiquée. Nous étudions la possibilité d'intégrer KC Flowdown dans la structure d'AMDEC. Pour ce faire, comme les outils préconisés ne sont pas sans inconvénients, nous passons en revue les principales attentes.

1.2. Les points d'amélioration des outils retenus dans la littérature pour l'identification des KCs

1.2.1. AMDEC

Comme un plan d'inspection (exécutable) l'exige naturellement, la hiérarchisation des risques devrait être limitée aux fonctions, caractéristiques, et paramètres mesurables et quantifiables.

Une courte revue de l'AMDEC classique est proposée ci-dessous pour pouvoir procéder par la suite à une analyse de ces « shortcoming » et proposer des modifications qui couvrent ces derniers.

L'AMDEC a été développé à la base comme une méthodologie formelle de la conception (Bowles & Peláez 1995). Cet outil de support pour les concepteurs s'est avéré être un outil puissant pour évaluer les défaillances potentielles et les empêcher de se produire (Sankar & Prabhu 2001), quels que soient leurs niveaux, le système, la conception, le processus … avant qu'ils n'atteignent le client (Stamatis 2003). La réalisation d'AMDEC par des experts transdisciplinaires, apporte cette vision globale pour répondre aux trois questions principales qui résument l'esprit de l'AMDEC (Sankar & Prabhu 2001) : « qu'est ce qui pourrait tourner mal? Qu'est ce qui pourrait provoquer cela ? Et quel effet cela aurait-il ? »

À travers l'AMDEC classique, le principal objectif est de prioriser les modes de défaillance potentiels en utilisant des Indices de Priorité de Risque (IPR), d'évaluer les causes et les effets des différents modes de défaillance, et d'éliminer ou de réduire le risque de défaillance par la préconisation des actions correctives. La hiérarchisation guide le choix d'attribution des ressources appropriées (mais en même temps limitées) aux modes de défaillance à haut risque. Elle vient ainsi en aide aux experts pour identifier et résoudre les anomalies néfastes au système et améliorer la performance à la fois lors des étapes de conception, d'industrialisation, et de production. L'estimation de la criticité passe par l'estimation de trois facteurs : l'occurrence de l'anomalie apparue qui cause l'apparition de la défaillance (F), la gravité de la conséquence de la défaillance (G), et la difficulté de détection de la défaillance (D). Les notes d'IPR devront être recalculées suite à la mise en place des actions correctives pour voir si les risques ont baissé, et vérifier l'efficacité des mesures correctives pour chaque mode de défaillance.

D'une manière générale, ils doivent être évalués à l'aide d'une échelle 1-10. Ainsi, il est généralement difficile d'être précis sur ces estimations tout d'abord parce qu'elles sont basées sur une échelle ordinale et ensuite elles sont dues à la multiplication et l'agrégation de ses facteurs. La prise de décision finale s'avère être subjective et engendre l'incertitude suite à la multiplication de ces trois facteurs.

Cette méthode IPR montre quelques faiblesses importantes lorsque l'AMDEC est appliquée dans le monde réel. De nombreuses approches alternatives ont été proposées dans la littérature pour résoudre certaines insuffisances de la méthode IPR ou compenser d'autres points faibles de l'AMDEC. (Liu et al. 2013) ont proposé une revue exhaustive de la littérature, recueillie et analysée de 1992 à 2012. Les inconvénients généraux sont extraits et classés, et de multiples approches pour éviter la subjectivité dans la détermination des priorités en matière de risque sont mises en avant. Cette étude nous permet non-seulement d'argumenter l'inefficacité de l'AMDEC classique dans certains contextes mais ouvre aussi des perspectives pour de futurs apports à cet outil. Il convient de noter que souvent dans la littérature, au moins deux points faibles de l'AMDEC classique sont traités simultanément. Les points suivants sont extraits de cette analyse et sont classés en trois catégories :

- L'évaluation des facteurs de risque et leurs importances relatives
  - Les trois facteurs de risque sont difficiles à évaluer de façon précise.
  - L'importance relative des facteurs de risque F, G, et D, n'est pas prise en considération. Les prises de décisions dans le monde réel demandent souvent la pondération des facteurs engagés.
- L'agrégation des facteurs de risque
  - Différentes combinaisons de F, G, et D, peuvent produire exactement la même valeur de l'IPR, mais l'implication des risques dans la valeur obtenue mérite d'être vue indépendamment pour une meilleure prise de décision.
  - Les notes d'IPRs ne sont pas continues et comportent souvent des ouvertures (trous). Sur une échelle de 1 à 1000, ils sont majoritairement repartis en bas de l'échelle. Cela entraîne des problèmes d'interprétation du sens des écarts entre différents IPRs.
  - L'IPR obtenu par la multiplication est fortement sensible aux variations de l'évaluation des facteurs de risque.
  - La formule mathématique pour la propagation des risques à IPR est certes, facile à mettre en place mais elle est discutable et contestable (notamment pour des raisons citées en deuxième et troisième point de la présente liste).
  - L'IPR ne peut pas être utilisé pour mesurer l'efficacité des actions correctives. S'assurer de l'efficacité des actions menées est indispensable dans le contexte d'amélioration continue.
- L'interdépendance
  - L'interdépendance entre divers modes de défaillances et leurs effets n'est pas prise en compte.

À cela nous ajoutons certains points en particulier du point de vue de la « génération d'un plan d'inspection » ou CAIP :

- Les facteurs de risque F, G, et D ne sont pas forcément adaptés à tous les contextes et en particulier aux étapes de la conception. L'estimation de ces facteurs dépend de l'information disponible au stade de l'application d'AMDEC.
- La structure d'AMDEC est adaptée au contexte de mise en place des actions correctives suite à l'apparition des anomalies et non au contexte du CAIP. Cependant sa facilité de mise en œuvre et la flexibilité de sa structure en font un outil potentiel pour le CAIP.
- La Non-dépendance des différents niveaux d'AMDEC engendre une perte d'information déjà existante à un niveau donné. Les informations exprimées par les experts ne sont pas tracées et réutilisées (réutilisables) mais ignorées et ré-exprimées.

Toutefois ces inconvénients sont largement traités par la littérature. L'objectif des travaux de recherche est de compenser ces inconvénients. Les modifications sont apportées à l'AMDEC classique. Ce qui a rendu ces modifications nécessaires et surtout

praticables, est la nature transverse et multidisciplinaire de l'AMDEC. Ces avantages et sa facilité de mise en œuvre ont motivé de nombreuses utilisations et recherches.

La grande majorité des travaux de recherche s'articule autour de l'amélioration de la méthodologie d'analyse de la criticité (Liu et al. 2013) et ont identifié certaines approches d'amélioration dont Multi Criteria Decision Making (MCDM), programmation mathématique, intelligence artificielle, …. Dans ce qui suit nous allons nous intéresser plus particulièrement à celles qui s'inscrivent dans la catégorie de MCDM (pour établir des priorités des modes de défaillance) puisqu'elles s'approchent le plus de l'esprit dominant de ce travail. Le succès des approches Multiple Attribute Decision Analysis (MADA) en général est dû au fait que les problèmes sont caractérisés par à la fois des attributs quantitatifs et qualitatifs avec différents types d'incertitudes.

Dans ce genre d'approche les facteurs de risque sont souvent considérés comme des critères d'évaluation, tandis que les modes de défaillance sont des alternatives comme celles proposées par (Franceschini & Galetto 2001). L'objectif est de prioriser les modes de défaillance par rapport à leurs criticités, jugées en fonction de trois facteurs de risque. Chaque critère est présenté par un sous-ensemble flou sur l'ensemble des alternatives à être sélectionnées. Après l'agrégation d'évaluations des critères pour chaque alternative, les modes de défaillance serons priorisés par des Risk Priority Code (RPC) maximum. Souvent dans la littérature, pour l'évaluation des facteurs de risque, l'incertitude des données est prise en compte par la logique floue à travers « trapezodial/triangular fuzzy numbers ». Associées à cela des méthodes d'agrégation des trois facteurs sont également proposées.

L'agrégation dans la littérature ne se limite pas à cela mais est aussi en partie consacrée au regroupement de la diversité des avis des experts sur la hiérarchisation des modes de défaillance sous différents types d'incertitudes telles que l'évaluation incomplète, l'ignorance et les intervalles. À chaque membre du groupe est attribué d'une manière générale un poids reflétant son importance relative dans l'équipe pour la détermination des priorités de risques inhérents aux modes de défaillance. Cela passe par une synthèse et agrégation des évaluations individuelles dans une évaluation globale (Chin et al. 2009). (Yang et al. 2011) propose uniquement une agrégation basée sur des notes indépendantes et nettes (crisp).

Egalement basée sur des valeurs nettes, (Braglia & Bevilacqua 2000) ont développé une approche d'analyse multi-attributs des défaillances par AHP, qui considère les facteurs de risque (F, G, D, et les coûts attendus) comme critères de décision et les causes éventuelles de défaillance comme les alternatives à hiérarchiser. La matrice de comparaison par paire a été utilisée pour évaluer les pondérations des critères et les priorités locales des causes en termes d'attribut de coût attendu. Les notes classiques des facteurs de risque sont normalisées et ensuite synthétisées à une priorité globale (en fonction des pondérations) pour les causes. Faisant référence à cela, (Carmignani 2009) a présenté une méthode de priorisation, Priorité coût AMDEC, par l'intégration du coût (de l'action corrective) dans le calcul d'IPR. On peut citer (Gilchrist 1993) comme un des pionniers qui a proposé un modèle de coût attendu pour améliorer l'AMDEC classique. Le coût attendu du client a été formulé par le produit de coût par défaut, le nombre d'articles

produits par lot, la probabilité de défaillance, et la probabilité de non-détection d'une défaillance. L'auteur estime que le modèle du coût attendu est plus rigoureux et pratique que l'IPR, et a le grand avantage de pousser les gens à réfléchir sur les coûts de la qualité. Par la suite (Ben-Daya & Raouf 1996) ont également proposé un modèle amélioré d'AMDEC et ont argumenté l'éventuel lien d'indépendance entre deux probabilités impliquées dans le calcul de coût proposé par (Gilchrist 1993). Ils évoquent aussi le fait que l'estimation de ces deux n'est pas toujours facile au stade de la conception d'un produit. Dans le modèle amélioré d'estimation de coût, ils donnent plus d'importance à la probabilité d'occurrence de défaillance qu'à celle de la non-détection.

D'autres approches de calcul d'IPR sont présentées par (Zammori & Gabbrielli 2012) fondées sur « Analytic Network Process » (ANP) qui améliore les capacités d'AMDEC standard en tenant compte des interactions possibles entre les principales causes de défaillance lors de l'évaluation de la criticité.

Ainsi certains travaux de recherche évitent toute sorte d'agrégation (multiplication, …) et se limitent à une prise de décision fondée sur les niveaux de chacun des facteurs (Dhillon 1999) (Bertolini et al. 2006) (Shahin et al. 2011). Ils proposent des grilles croisées des facteurs de risque permettant de juger la criticité des modes de défaillance. Nous pouvons les appeler des matrices de criticité. Il y a ainsi la possibilité d'attribuer un niveau de criticité à chaque mode de défaillance, en fonction de la fréquence de la défaillance et de son niveau de la gravité. Ces informations peuvent être résumées dans une matrice de criticité, où chaque ligne est associée à un niveau de gravité et chaque colonne est associée à un niveau de fréquence. Quatre ou neuf domaines différents de criticité sont souvent proposés tels que : {inacceptable, indésirable, acceptable avec révision, et acceptable sans révision}. Ils peuvent être appliqués indépendamment de la manière dont les facteurs sont évalués, par des valeurs nettes ou des sous-ensembles flous. Le nombre des domaines de criticité augmente lorsque l'évaluation des facteurs de risque se fait par des ensembles flous.

En ce qui concerne les approches floues (Braglia et al. 2003), elles présentent une prise de décision multi-attributs pour prioriser les causes de défaillance. Dans cette approche, les trois facteurs de risque ainsi que leurs pondérations peuvent être exprimés par des nombres flous triangulaires. Avant cela (Chang et al. 1999) ont intégré la méthode des ensembles flous et la théorie Grey dans l'AMDEC ou les variables linguistiques ont été utilisées pour l'évaluation des facteurs de risque F, G, et D et l'analyse relationnelle Grey a été appliquée pour déterminer les priorités de causes de défaillance. Pour cela les variables linguistiques sont « defuzzified » aux valeurs « crisp » ou nettes. La théorie de Grey, proposée par (Deng 1989), traite des décisions caractérisées par des informations incomplètes (Shih et al. 1996) (Wu et al. 1984), comme le fonctionnement, le mécanisme, la structure et le comportement, qui ne sont ni déterministes ni totalement connues, mais sont partiellement connus. Pour le calcul du coefficient relationnel de Grey et le degré de relationnel avec la série standard, les plus bas niveaux des trois facteurs de risque ont été définis comme une série standard, et l'information sur l'évaluation des trois facteurs de risque de chaque cause potentielle a été considérée comme une série comparative. Plus le degré relationnel est fort, plus petit est l'effet de cause potentielle. Par conséquent, l'ordre croissant des degrés de relationnel représentant la priorité des risques des problèmes

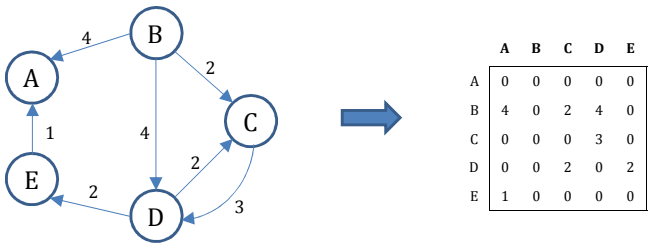
potentiels à améliorer (Chang et al. 2001) ont utilisé également la théorie de Grey mais les facteurs de risque sont évalués par une échelle classique ordinale. Les applications similaires des méthodes des ensembles flous (trapézoïdaux ou triangulaires) et la théorie Grey sont proposées par (Sharma et al. 2007) (Sharma et al. 2008), (Pillay & Wang 2003), (Chang et al. 2009), (Liu et al. 2012)…

(Bowles & Peláez 1995) ont décrit une approche fondée sur la logique floue pour prioriser les défaillances par un système d'AMDEC, qui utilise des termes linguistiques pour décrire F, G, D et le niveau de risque de défaillance. Les relations entre le niveau de risque et F, G, D ont été caractérisées par « fuzzy if-then rule » qui a été développé à partir des connaissances d'experts et d'expertises.

Néanmoins, les approches de la logique floue ne sont pas faciles à réaliser et nécessitent de nombreux jugements des experts. À cause de cela, elles sont très coûteuses et longues à mettre en place. (Wang et al. 2009) ont également argumenté l'effet d'utilisation de ce type de « fuzzy if-then rule ». D'après eux des règles avec la même conséquence mais avec différents antécédents ne peuvent pas être distinguées les uns des autres. En conséquence, les modes de défaillance caractérisés par ces règles ne pourront pas être priorisés ou classés. D'autant plus que, l'utilisation des « fuzzy if-then rule » n'offre aucun moyen d'intégrer l'importance relative des facteurs de risque dans le système.

(Seyed-Hosseini et al. 2006) ont proposé une méthode innovante, détaillée ci-dessous, pour redéfinir les priorités des modes de défaillance dans un système d'AMDEC pour les actions correctives. Dans cette approche, il est préférable de définir des priorités ou « Ranking » au lieu de la notation directe. Les principaux avantages sont l'implication des relations indirectes dans l'analyse, et la proposition des alternatives de « clustering » dans les systèmes larges. Dans la méthodologie proposée, les informations extraites de l'AMDEC ont été décrites par un graphe pondéré, où les nœuds indiquent les modes de défaillance ou les causes de défaillance et les connexions dirigées indiquent les effets des causes entre eux. En outre, les poids des connexions indiquent le degré ou la gravité des effets d'une cause sur le mode de défaillance.

1. Le concepteur ou « Decision-Maker » évalue la relation entre les alternatives des ensembles de paires. À la suite de cette évaluation, on obtient une matrice des relations directes qui contient des données initiales de cette analyse (Figure 46).



	A	B	C	D	E
A	0	0	0	0	0
B	4	0	2	4	0
C	0	0	0	3	0
D	0	0	2	0	2
E	1	0	0	0	0

Figure 46. Graphe typique des relations directes et la matrice correspondante, M

2. Les éléments de la matrice de gravité relative directe sont obtenus. Cette matrice, M', est une matrice des relations directes entre les alternatives. C'est aussi la version normalisée de la matrice M.
3. Par la suite les éléments de la matrice de gravité relative directe et indirecte sont à calculer. Une relation indirecte représente l'effet d'un mode de défaillance (en tant que cause) sur un autre mode de défaillance. La matrice M'' consiste en toutes les relations, y compris les relations directes et indirectes entre les alternatives. Généralement, M''ij > 0 signifie qu'il y a une relation de l'alternative i vers alternative j, directement ou indirectement, avec une gravité d'influence de valeur M''ij. Ou bien cela signifie que l'alternative i a une priorité face à l'alternative j avec le degré de gravité de valeur M''ij.
4. A partir de cette dernière matrice M''ij, les valeurs de L+C et L-C sont déterminées, où C est la somme des colonnes et L est la somme des lignes de la matrice. Ces valeurs représentent un degré d'influence et un niveau de relation. Dans ce cas, les alternatives sont classées dans l'ordre décroissant, en termes de valeurs de L+C et L-C. La valeur du L-C indique la gravité de l'influence de chaque alternative. Les alternatives ayant une valeur élevée de L-C ont une influence supérieure sur l'autre et sont supposées avoir la priorité. Celles ayant une valeur faible de L-C reçoivent plus l'influence des autres et sont supposées avoir un degré faible de priorité. De même la valeur de L+C indique le degré de relation entre chaque alternative avec les autres. Les alternatives ayant une valeur considérable de L+C ont plus de relation et celles ayant des valeurs faibles de L+C ont donc peu de relation dans le système. En pratique, la valeur de L-C porte plus d'indications par rapport à L+C. Les alternatives ayant plus d'effets sur les autres ont la priorité et sont appelées « Dispatcher » contre celles appelées récepteurs. En conséquence, la hiérarchisation des alternatives peut être déterminée en fonction du type de relations et la gravité des effets. Néanmoins la prise de décision pour la priorisation des alternatives semble être non-exhaustive pour des systèmes complexes lors que les valeurs des deux critères de priorisation, L-C et L+C, sont en conflit.

Comme nous avons pu voir à travers cette revue de la littérature F, G et D sont les trois principaux facteurs de risque identifiés pour l'AMDEC. Même si d'autres facteurs de risque pouvaient être inclus, la principale préoccupation de ce travail de recherche n'est pas l'identification des facteurs de risque, mais leur évaluation et leur agrégation. Les trois facteurs de risque peuvent être évalués numériquement ou d'une manière linguistique. Deux d'entre eux ont été largement appliqués et ont leurs avantages et inconvénients.

Quel que soit le type d'évaluation, un certain niveau d'incertitude est incontestablement impliqué dans l'AMDEC par l'évaluation des facteurs de risque principalement basées sur des jugements subjectifs des experts, généralement complet ou incomplet, précis ou imprécis, et certains ou incertains. La plupart des experts sont prêts à exprimer leurs opinions par des degrés de croyance (ou mesures de possibilité) basés sur un ensemble de notes d'évaluation, à savoir {très faible, faible, modéré, élevé et très élevé}.

Dans cette section les apports majeurs de la littérature à l'outil classique d'AMDEC ont été revus. En synthèse, les facteurs de risque n'ont pas subis des modifications majeures. Pour l'agrégation de ces facteurs, le choix de multiplication a été toujours écarté. Cependant la décision se base toujours sur une priorisation fondée sur l'ensemble des facteurs. Egalement le non-traitement de l'incertitude des informations a été démontré comme ayant un effet néfaste pour une prise de décision robuste. Il est à noter que quelle que soit la méthode de priorisation, l'inconvénient lors de la prise de décision est de devoir définir une limite à partir de laquelle nous mettons en place des actions correctives. Cette limite peut être cruciale au regard du résultat final sur le système.

1.2.2. KC Flowdown

Parmi les trois approches de l'état de l'art qui catégorisait les outils et méthodes, aucune ne semble suffisante à elle-seule pour offrir le meilleur compromis sur toutes les exigences. Les approches sont souvent exploitées simultanément. C'est-à-dire qu'il faut un ensemble d'outils et méthodes attachés aux différentes approches pour garantir la qualité au moindre coût (Thornton 2000).

A l'origine de cette mise en relation des approches est d'abord l'interdépendance des critères à satisfaire, et ensuite les liens de causalité entre les causes et les effets des variations d'un niveau à un autre, ce qui permet également de suivre la propagation des critères. Les outils ne se positionnent pas tous au même niveau mais traitent chacun uniquement « un bout » du système. En outre, ces relations facilitent la modélisation du coût, de la qualité qui se propage dans l'ensemble du système pour évaluer l'impact des différentes stratégies de réduction de la variation, dont l'inspection. L'outil qui représente le mieux ces causalités est KC Flowdown. Il peut ainsi s'associer à un outil quelconque pour le rendre plus efficace sur le plan économique, pour la maîtrise des variations, …. Par cette vision uniquement offerte par KC Flowdown, pour un plan d'inspection, les KCs peuvent prendre plusieurs formes : « Critical Parameters », « Critical-to-Function Responses », « Critical to Quality Variables » et « Special Characteritics » (Chen 1999).

Certains points sont à retenir sur KC Flowdown :

- La structure arborescente de KC Flowdown permet de visualiser rapidement le manque d'information du système. Il permet aux concepteurs de capitaliser leurs connaissances.
- L'arbre de KC Flowdown peut être rempli du haut vers le bas comme du bas vers le haut, jusqu'au moment où les informations se croisent et l'arbre se complète. Cela dépend des experts ou des informations les plus concrètes au sein du système.
- Il fait apparaitre les informations contradictoires dans le système.
- Le manque d'information sur un élément du système suffit pour que l'arbre soit inexploitable et ne répond pas aux attentes.
- Il permet d'exploiter l'ensemble d'un système d'une manière descendante pour le développement des solutions de conception et d'une manière ascendante pour la vérification d'impact des solutions de conception ou pour l'identification des problèmes comme proposé par (Etienne 2007).

- Les informations sur des relations entre les KCs peuvent être sous formes d'équations, contraintes, règles…. Elles pourraient être qualitatives ou quantitatives en fonction des besoins et de la granularité des informations disponibles, la précision des estimations et la facilité exigée pour l'utilisation des outils.

KC Flowdown représente également certains inconvénients :

- Il devient inexploitable pour un système complexe.
  - Il pose des problèmes de lecture pour l'analyse.
  - Il nécessite un autre outil afin de formaliser le réseau de KC et d'heuristiques pour l'exploiter.
- Il ne permet pas la notation des facteurs de risque attachés aux fonctions, caractéristiques, spécification, paramètres, … et alors ne permet pas d'identifier les exigences les plus critiques.

Néanmoins la flexibilité d'outil le rend adaptable à tout contexte. Grace à sa structure arborescente dans le contexte de la planification d'inspection, cet outil fournit une vue compréhensive du système et met l'accent sur les facteurs de risque des variations potentielles. Les variations potentielles sont celles susceptibles de faire l'objet d'inspection. Nous nous intéressons à la traçabilité des variations, à leurs contributeurs et la façon dont elles se propagent du niveau des fonctions à d'autres niveaux du système. L'exploitation d'un système (de production) peut aller jusqu'au niveau des ressources dont les impacts de leurs variations peut aboutir à une non-qualité (Figure 47). L'arborescence des caractéristiques présentée est tirée de (Whitney 2004).

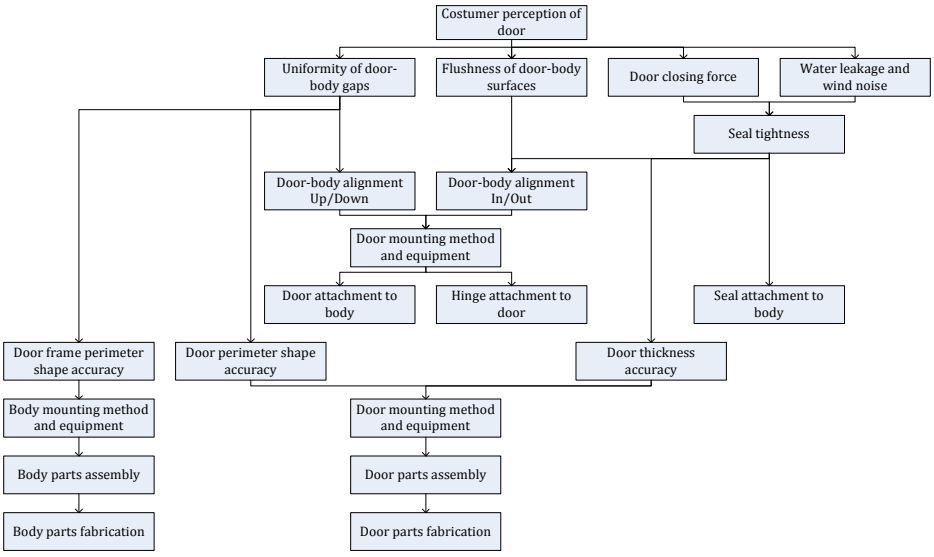


Figure 47. Traçabilité des Variations/Propagations de risque selon (Whitney 2004)

Tandis que l'atténuation du risque de variation peut être réalisée par différentes voies ; la conception, le processus, l'amélioration de fabrication et de l'inspection, ces travaux se focalisent sur la proposition d'un plan optimal d'inspection de la qualité. Par cette synthèse nous avons répondu à une question :

- Est-il nécessaire d'apporter des modifications ?

La section suivante est consacrée à certaines questions au regard des outils abordés ci-dessus pour l'ajuster au mieux à la première activité A01.

- Pourquoi les modifications sont-elles nécessaires au vu de l'activité A01 ?
- Quelles sont les modifications nécessaires ?
- Est-il possible de coupler les deux outils ?
- Comment ?
- …

1.3. L'outil proposé, Analyse de la Causalité, des Défaillances, et leurs Effets (ACDE)

L'AMDEC semble être capable de remplir partiellement les besoins de la planification d'inspection, mais requiert certaines adaptations. À travers la structure d'AMDEC, ce qui est mis en pratique, est une démarche de la prise de décision. Elle peut être naturellement améliorée en tant qu'une démarche par l'enrichissement des informations requises, modification des étapes, …. Ce travail de recherche a abouti à la proposition d'un outil inspiré d'AMDEC où la démarche de prise de décision, la structure, les étapes, et même l'objectif sont adaptés au contexte de la planification d'inspection. La section suivante est consacrée à l'illustration de la structure de l'outil proposé nommé « Analyse de la Causalité, des Défaillances, et de leurs Effets (ACDE) ».

1.3.1. Illustration de la structure proposée

Nous détaillons à présent la grille d'ACDE en s'appuyant sur le cas d'étude d'une pompe hydraulique (Voir Annexes II et III).

1.3.1.1. Détails de la grille

Le Tableau 17 présente le tableau d'analyse du produit.

Tableau 17. ADCE, tableau d'analyse du produit

			Pourquoi		Comment					
	Fonction-Opération	Critère d'acceptation « quantitatif »	Fonction	Est impacté de	Fonction-Opération	Contribution	Critère d'acceptation « quantitatif »	Contribution	Gravité	Difficulté de réalisation
Niveau	1	2	3		4		5		6	7
I. Produit	Fonction de produit	Exigence + Critère d'inspection	Pourquoi	Est impacté de	Fonction Technique Elémentaire	Impact	Spécification fonctionnelle	Impact	Gravité de fonction	Difficulté de réalisation de fonction

I.1. Fonction de produit : Avant tout, en première colonne, les fonctions associées au produit au niveau de l'assemblage sont identifiées. Elles peuvent être issues d'une analyse fonctionnelle (Voir Annexe II pour l'analyse fonctionnelle de la pompe). À savoir que quel que soit le niveau, produit ou pièce, pour une meilleure analyse fonctionnelle nous pouvons différencier certains type de fonction : une fonctionnalité du système attendue par le client comme pour la pompe, *« Transformer l'énergie mécanique en énergie hydraulique »*, une fonction garantie par une « condition d'aptitude a l'emploi » comme *« Accumuler et réguler la pression d'huile HP »* caractérisée par la fuite maximale et minimale autorisée, et une condition d'assemblage comme *« Fixer et adapter la pompe sur différents moteurs »*. Cela peut être la traduction de la colonne de l'Effet de l'AMDEC produit classique (conséquence client). Dans le contexte d'identification des KCs pour la planification d'inspection, les fonctions identifiées sont susceptibles d'être soumises aux mesures d'inspection, suite à une hiérarchisation de leurs niveaux de criticité. Et donc soumises à la hiérarchisation des risques. Il est donc nécessaire d'évoquer leurs critères d'acceptation.

I.2. Exigences et critères d'inspection : La deuxième colonne du tableau d'ACDE au niveau de l'analyse du produit, met en avant les exigences et les critères quantitatifs d'acceptation. Ainsi il est clair que l'analyse de la criticité au niveau du produit se limite aux exigences et caractéristiques mesurables. À noter que de multiples critères d'acceptation peuvent être associés à chaque fonction identifiée en première colonne. À ce niveau, le critère d'acceptation, décrit par le TAFT pourrait être transmis. Ces critères d'acceptation assurent certes la fonctionnalité du produit mais aussi confirme la faisabilité de l'inspection au niveau du produit. À titre d'exemple le critère d'acceptation inhérent a la fonction de pompe *« Accumuler et réguler la pression d'huile HP »*, serait les limites autorisées de fuite.

I.3. Fonction/Pourquoi : La troisième colonne consiste d'une manière générale à répondre aux questions suivantes pour chaque fonction identifiée en première colonne : Pourquoi la satisfaction de la fonction est-elle importante (À quoi contribue-t-elle ?) À quel point contribue-t-elle ? Au niveau de l'analyse du produit par ACDE, il n'y pas de fonction de plus haut niveau. Cette colonne n'est donc pas à remplir pour l'analyse du produit.

I.4. Fonction Technique Elémentaire : La quatrième colonne a pour but d'identifier les fonctions techniques élémentaires (FTE) de l'ensemble des composants du produit. C'est-à-dire qu'elle répond à la question suivante : Comment les fonctions du produit sont-elles assurées ? Cela rappelle la colonne des causes en AMDEC classique. Cette colonne d'ACDE est constituée de la description textuelle (et non des limites mesurables et quantifiables comme en deuxième colonne), des FTEs. Elles sont soit associées à la fois à deux ou plusieurs composants du produit (comportement pièce-pièce), soit intrinsèques à un seul composant. Par exemple pour la fonction du produit *« Accumuler et réguler la pression d'huile HP »*, les FTEs sont *« Limite le passage du fluide via les engrenages et CPHC, et le corps de pompe »*, *« Empêche le passage du fluide entre CPHC et le moteur »*, et *« Empêche le passage du fluide entre CPHC et la crépine »*. Chaque fonction du produit peut donc être attachée

à plusieurs FTEs. Nous souhaitons également savoir à quel point chacune de ces FTEs contribuent à la satisfaction des fonctions du produit. Une colonne est alors consacrée à l'estimation de ces impacts.

I.5. Spécification fonctionnelle : La cinquième colonne applique un autre niveau de décomposition de l'analyse du produit. À partir de chaque description qualitative de cause en quatrième colonne, les critères quantitatifs d'acceptation doivent être identifiés. Attaché à chaque FTE relative à certain composants, il existe de multiples spécifications ou caractéristiques associées aux composants. En effet les spécifications des pièces impactent les fonctions du produit à travers la réalisation des FTEs. Ceci est traité par le TAFT à travers la colonne de « Spécifications des surfaces ». Pour revenir à l'exemple de la pompe, la FTE *« Limite le passage du fluide via les engrenages et CPHC, et le corps de pompe »*, les spécifications sont *« Diamètres des cercles de tête des engrenages »*, *« Diamètres des cy100 et cy101, le logement des engrenages dans le corps de pompe appelés les oreilles de mickey »*,… (Voir Annexe III pour la définition de la pièce, corps de pompe). Une colonne est enfin consacrée à l'estimation de l'impact de chacune de ces spécifications sur la FTE correspondante. Une priorisation de l'importance des caractéristiques peut également suffire.

I.6. Gravité de la fonction : En sixième colonne la gravité de chaque fonction du produit identifiée en première colonne doit être exprimée par les experts en répondant à une question : a quel point est-il important de satisfaire une fonction ? Cette estimation peut être issue du tableau de hiérarchisation des fonctions attribuées par l'analyse fonctionnelle. À noter qu'en AMDEC produit classique, la gravité est estimée en association à chaque cause alors qu'en ACDE, elle est estimée vis-à-vis de chaque fonction du produit.

I.7. Difficulté de réalisation de la fonction : En septième et dernière colonne, la difficulté de réalisation de chaque fonction du produit doit être estimée en répondant à la question suivante : À quel point est-il difficile de réaliser cette fonction ? Nous pouvons dire que ce facteur de risque, est l'inverse du facteur de fréquence d'apparition de défaillance proposé par AMDEC, tandis qu'ils ont la même origine, la capabilité du processus.

Le Tableau 18 présente le tableau d'analyse des composants.

Tableau 18. ADCE, tableau d'analyse des composants

			Pourquoi		Comment					
	Fonction-Opération	Critère d'acceptation « quantitatif »	Fonction	Est impacté de	Fonction-Opération	Contribution	Critère d'acceptation « quantitatif »	Contribution	Gravité	Difficulté de réalisation
Niveau	1	2	3		4		5		6	7
II. Pièce	Fonction Technique Elémentaire	Spécification fonctionnelle + Critère d'inspection	Fonction de produit	Est impacté de	Opération	Impact	Paramètre de processus	Impact	Gravité de FTE	Difficulté de réalisation de FTE

II.1. Fonction Technique Elémentaire : La première colonne réunie les FTEs. Elles peuvent être issues de l'analyse fonctionnelle de chacune des pièces composant le produit. À noter qu'une analyse exhaustive des pièces nécessite un nombre de tableaux d'ACDE équivalent au nombre de pièces (idem à TAF0T). À titre d'exemple pour l'analyse du corps de la pompe, les FTEs identifiées sont : *« Limite le passage du fluide via les engrenages et CPHC, et le corps de pompe »*, *« Résiste aux actions mécaniques due aux frottements des engrenages et CPHC »*, …

II.2. Exigences et critères d'inspection : Le(s) critère(s) de mesure associés à chaque FTE et inhérent à la pièce actuellement analysée doivent être exprimés. Ces critères sont les spécifications et leurs limites indiquées par la conception. Comme précédemment pour l'analyse du produit ces critères démontrent que les FTEs sont mesurables d'une manière objective. Par exemple pour la FTE *« Limite le passage du fluide via les engrenages et CPHC, et le corps de pompe »* les critères d'acceptation concerne *« Diamètres des cy100 et cy101, le logement des engrenages dans le corps de pompe »*, *« Co-axialité de cy100 et cy101, cy102, cy103 de CPHC »*, … (Voir Annexe III, le contrat de phase) et leurs limites de tolérance.

II.3. Fonction de produit : La troisième colonne est consacrée à l'identification des fonctions du produit dont la satisfaction dépend des FTEs identifiées en première colonne. Il est clair que de multiples fonctions du produit (conséquences) peuvent être associées à chaque FTE. Par ailleurs une fonction du produit peut être commune à plusieurs FTEs comme *« Accumuler et réguler la pression d'huile HP »* commune à *« Empêche le passage du fluide entre CPHC et le moteur »*, et *« Empêche le passage du fluide entre CPHC et la crépine »*. Nous souhaiterons estimer également le niveau de contribution des FTEs sur les fonctions du produit.

II.4. Opération : La quatrième colonne a pour but de discerner les opérations du processus de fabrication de chaque pièce et de les associer aux FTEs auxquelles elles ont contribué. Elle décrit des opérations considérées comme des causes qualitatives des FTEs. Elles assurent l'aboutissement des FTEs (par le biais des

spécifications identifiées en deuxième colonne). Pour mieux identifier ces dernières il serait judicieux de s'appuyer sur la gamme de fabrication, les contrats de phase de chaque pièce, et les spécifications à réaliser. Sur l'exemple de la pompe, l'opération *« Contourner cy100 et cy101 en finition Ø31.35 »* est identifiée pour contribuer à la FTE *« Résiste aux actions mécaniques dues aux frottements des engrenages et CPHC »* par la réalisation de la spécification *« Diamètres des cy100 et cy101, le logement des engrenages dans le corps de pompe »* (Voir Annexe III pour la description de la gamme détaillée de corps de pompe). Les experts doivent estimer également le niveau d'impact des opérations sur les FTEs. À noter que chaque opération peut correspondre à plusieurs spécifications au sein d'une même FTE. L'estimation de la contribution d'une opération donnée est donc différente selon la spécification concernée.

II.5. Paramètre de processus : La cinquième colonne du tableau d'analyse des composants identifie les paramètres (multiples ou pas) du processus associés à chaque opération. Les paramètres du processus et leurs limites définies sont considérés comme des causes quantitatives pour la réalisation des FTEs. L'identification de ceux-ci peut s'inspirer de la gamme détaillée de fabrication. Selon l'opération cela peut être *« Vitesse de coupe »*, *« Avance radiale »*,.... Le niveau d'impact de ces paramètres sur l'efficacité de l'opération doit être ensuite estimé.

II.6. Gravité de FTE : La note de gravité de chaque fonction technique élémentaire doit être attribuée en sixième colonne.

II.7. Difficulté de réalisation de la FTE : En dernière colonne le niveau de la difficulté de réalisation des FTEs doit être estimé.

Le Tableau 19 présente le tableau d'analyse du processus.

Tableau 19. ADCE, tableau d'analyse du processus

			Pourquoi		Comment					
	Fonction-Opération	Critère d'acceptation « quantitatif »	Fonction	Est impacté de	Fonction-Opération	Contribution	Critère d'acceptation « quantitatif »	Contribution	Gravité	Difficulté de réalisation
Niveau	1	2	3		4		5		6	7
III. Processus	Opération de processus	Paramètre de processus + Critère d'inspection	Fonction Technique Elémentaire	Est impacté de	Comment	Impact	Comment « quantitatif »	Impact	Gravité d'opération	Difficulté de réalisation d'opération

III.1. Opération de processus : La première colonne du tableau d'analyse du processus décrit les opérations de fabrication destinées à la réalisation des pièces. Ces opérations sont extraites de la gamme détaillée de fabrication. Il existe donc un tableau d'analyse du processus associé à chaque pièce. Prenons le corps de la pompe CPHC. Pour celle-ci les opérations sont *« Contourner cy100 et cy101 en finition Ø31.35 », « Surfacer le plan du corps de la pompe en contact avec la crépine », « Surfacer le plan du corps de la pompe en contact avec le moteur »,* ….

III.2. Paramètres de processus et critère d'inspection : Le(s) critère(s) de mesure, associés à chaque opération sont à identifier en deuxième colonne. Ces critères rendent les opérations mesurables d'une manière objective et dont la variation impacte l'efficacité des opérations. Ici, l'expression « paramètres du processus » regroupe les paramètres opératoires, les paramètres de réglages, … comme mentionné dans l'introduction.

III.3. FTE : La troisième colonne de tableau d'analyse du processus réunit les FTEs, considérées comme des conséquences des opérations effectuées pour la réalisation des pièces à travers les spécifications. Une autre question qui doit être posée est : À savoir à quel point, les FTEs sont-elles influencées par chacune des opérations ? Pour l'opération *« Contourner cy100 et cy101 en finition Ø31.35 »*, nous pouvons parler de *« Limite le passage du fluide via les engrenages et CPHC, le corps de pompe »*, *« Résiste aux actions mécaniques due aux frottements des engrenages et CPHC »*, *« Montabilité des pignons sur CPHC »*, ….

III.4. Au niveau processus, la colonne quatre n'est pas remplie car elle vise à expliciter le « comment », c'est-à-dire les éléments du niveau inferieur permettant d'assurer cette opération.

III.5. Idem au niveau processus, la colonne cinq n'est pas remplie.

III.6. Gravité d'opération : La note de gravité, un des deux facteurs de risque, des opérations de fabrication doit être estimée.

III.7. Difficulté de réalisation d'opération : Le niveau de la difficulté de réalisation des opérations du processus de fabrication est estimé en septième colonne. Attention, comme mentionné dans l'introduction, la notion de caractéristique processus ne se limite pas aux paramètres opératoires, la notion de difficulté de réalisation englobe les notions de capabilités, de défaillance du système de production, …

Nous pouvons remarquer que les trois grilles d'analyse du produit, de ses composants, et du processus partagent des données communes. Ce qui est également le cas d'AMDEC classique par ses multiples niveaux où ces données sont identifiées et ré-identifiées à chaque niveau d'analyse, et les facteurs de risque sont estimés et ré-estimés. Cependant l'exploitation simultanée des liens de causalité avec la mise en œuvre des trois tableaux d'analyse peut empêcher la perte et la ré-identification des données, et donc la ré-estimation des facteurs de risque, la gravité et la difficulté de réalisation. La section suivante détaille les relations causales entre les trois grilles précédemment décrites.

1.3.1.2. Détails des relations entre grilles

Certaines colonnes de ces trois grilles sont reliées par des liens croisés. Ces liens sont décrits ci-dessous et sont catégorisés par leurs finalités : tracer les causalités, propager les facteurs de risque (la gravité, propager la difficulté de réalisation).

- La causalité :
  - Lien A : Comme décrit précédemment les fonctions du produit sont identifiées en première colonne du tableau d'analyse du produit mais aussi en troisième colonne de la grille d'analyse des composants en tant que conséquences des FTEs. Comme illustré en Tableau 20 cette ré-identification peut être remplacée par un transfert de celles-ci du niveau d'analyse du produit à l'analyse des composants (d'une manière descendante). Pour ce qui est de l'étude de cas de la pompe, la fonction du produit *« Accumuler et réguler la pression d'huile HP »* est transférée du tableau d'analyse du produit d'ACDE à la troisième colonne du tableau d'analyse des composants, à la ligne correspondante c'est-à-dire celle de la fonction de pièce *« Limite le passage du fluide via les engrenages et CPHC, et le corps de pompe »*.

Tableau 20. ADCE, Causalité (A) entre les fonctions du produit et les FTEs de ses composants

			Pourquoi		Comment					
	Fonction-Opération	Critère d'acceptation « quantitatif »	Fonction	Est impacté de	Fonction-Opération	Contribution	Critère d'acceptation « quantitatif »	Contribution	Gravité	Difficulté de réalisation
Niveau	1	2	3		4		5		6	7
I. Produit	Fonction de produit	Exigence + Critère d'inspection	Pourquoi	Est impacté de	Fonction Technique Elémentaire	Impact	Spécification fonctionnelle	Impact	Gravité de fonction	Difficulté de réalisation de fonction
	A									
II. Pièce	Fonction Technique Elémentaire	Spécification fonctionnelle + Critère d'inspection	Fonction de produit	Est impacté de	Opération	Impact	Paramètre de processus	Impact	Gravité de FTE	Difficulté de réalisation de FTE

  - Liens B, D : Les FTEs sont identifiées en quatrième colonne du tableau d'analyse du produit ainsi qu'en première colonne de l'analyse des composants. Pour éviter la perte de données et garder une certaine

cohérence les FTEs, « Comment », sont à transférer de l'analyse du produit à l'analyse des composants (Tableau 21). De même leurs niveaux d'impact sur les conséquences sont transmis en troisième colonne de l'analyse des composants où les fonctions du produit apparaissent (Tableau 21). Ces niveaux d'impact sont en effet des facteurs de propagation détaillés ultérieurement qui permettent la propagation des facteurs de risque, au lieu de devoir les ré-estimer à chaque niveau d'analyse. Ces liens ne font pas qu'un simple transfert. Ils trient également les FTEs qui correspondent à chaque tableau d'analyse des composants, à savoir qu'à ce niveau, il existe un tableau par composant. À titre d'exemple au sein du tableau d'ACDE de l'analyse du produit, *« Transformer l'énergie mécanique en énergie hydraulique »* a amené à identifier des FTEs dont *« Limite le passage du fluide via les engrenages et CPHC, le corps de pompe »* et *« limite le passage du fluide entre les engrenages »* (Voir Annexe II). Au niveau de l'analyse des composants nous ne transmettons que la FTE *« Limite le passage du fluide via les engrenages et CPHC, et le corps de pompe »* au tableau correspondant au corps de la pompe. Autrement dit les FTEs inhérentes à toutes les pièces seront réparties sur plusieurs tableaux d'ACDE du niveau de l'analyse des composants.

Tableau 21. Causalité (B, D) entre les fonctions du produit et les FTEs de ses composants

			Pourquoi		Comment					
	Fonction-Opération	Critère d'acceptation « quantitatif »	Fonction	Est impacté de	Fonction-Opération	Contribution	Critère d'acceptation « quantitatif »	Contribution	Gravité	Difficulté de réalisation
Niveau	1	2	3		4		5		6	7
I. Produit	Fonction de produit	Exigence + Critère d'inspection	Pourquoi	Est impacté de	Fonction Technique Elémentaire	Impact	Spécification fonctionnelle	Impact	Gravité de fonction	Difficulté de réalisation de fonction
					B					
II. Pièce	Fonction Technique Elémentaire	Spécification fonctionnelle + Critère d'inspection	Fonction de produit	Est impacté de	Opération	D Impact	Paramètre de processus	Impact	Gravité de FTE	Difficulté de réalisation de FTE

– Lien C : Les spécifications fonctionnelles identifiées en cinquième colonne du tableau de l'analyse du produit, apparaissent également en deuxième

colonne du tableau d'analyse des composants. Il est proposé donc de les transférer en tant que critères d'inspection des caractéristiques quantifiables (Tableau 22). À noter que dans le contexte de planification d'inspection et d'identification des KCs, selon la stratégie de l'entreprise, les caractéristiques quantifiables ne peuvent être transférées qu'en partie. C'est-à-dire que d'un point de vue économique, il est peut être judicieux de ne transférer que les caractéristiques les plus pertinentes. Cela passe par leur priorisation grâce aux impacts estimés en cinquième colonne de l'analyse du produit. Elles seront donc considérées comme pertinentes et transférées si :

- Soit la gravité de la fonction concernée du produit est élevée,
- Soit l'impact des critères d'acceptation sur la fonctionnalité est élevé, malgré une gravité faible associée à la fonction.

Pour revenir sur l'exemple de la pompe, les critères quantitatifs d'acceptation les plus pertinents (et pas tous), attachés au corps de la pompe, correspondant à la fonction de la pièce *« Limite le passage du fluide via les engrenages et CPHC, le corps de pompe »* sont à transférer ; *« Diamètres des cy100 et cy101, le logement des engrenages dans le corps de pompe appelés les oreilles de mickey »*, *« Co-axialité de cy100 et cy101, cy102, cy103 de CPHC »*, … (Voir Annexe III).

Tableau 22. Causalité (C) entre les fonctions du produit et les FTEs de ses composants

			Pourquoi		Comment					
	Fonction-Opération	Critère d'acceptation « quantitatif »	Fonction	Est impacté de	Fonction-Opération	Contribution	Critère d'acceptation « quantitatif »	Contribution	Gravité	Difficulté de réalisation
Niveau	1	2	3		4		5		6	7
I. Produit	Fonction de produit	Exigence + Critère d'inspection	Pourquoi	Est impacté de	Fonction Technique Elémentaire	Impact	Spécification fonctionnelle	Impact	Gravité de fonction	Difficulté de réalisation de fonction
							C			
II. Pièce	Fonction Technique Elémentaire	Spécification fonctionnelle + Critère d'inspection	Fonction de produit	Est impacté de	Opération	Impact	Paramètre de processus	Impact	Gravité de FTE	Difficulté de réalisation de FTE

- La propagation :

– Propagation de la gravité, E, F : Lors de l'analyse du produit les gravités des fonctions du produit sont estimées en sixième colonne. En même temps les liens de causalité entre les fonctions du produit et les FTEs, et leurs niveaux de contributions sont identifiés au même niveau en quatrième colonne. Grâce à ces informations déjà extraites, nous proposons la propagation (et non ré-estimation) de la gravité au niveau de l'analyse des composants pour maintenir la cohérence entre les estimations de gravité dans l'ensemble des niveaux d'ACDE. La propagation descendante de la gravité est proposée car il est plus facile de juger la gravité des fonctions du produit que celle des FTEs ou encore des caractéristiques de plus bas niveau. Pour cette propagation, la gravité est l'élément propagé, le niveau d'impact de FTE sur la fonction du produit est le facteur de propagation (Tableau 23). La gravité de la fonction du produit *« Accumuler et réguler la pression d'huile HP »* impactée par la FTE de la pièce de corps de la pompe *« Limite le passage du fluide via les engrenages et CPHC, le corps de pompe »* et la contribution de cette dernière sur la fonction de produit, conduisent à l'estimation de la gravité de FTE au niveau de l'analyse des composants.

Tableau 23. Propagation (E-F, G-H) de la gravité et de la difficulté de réalisation

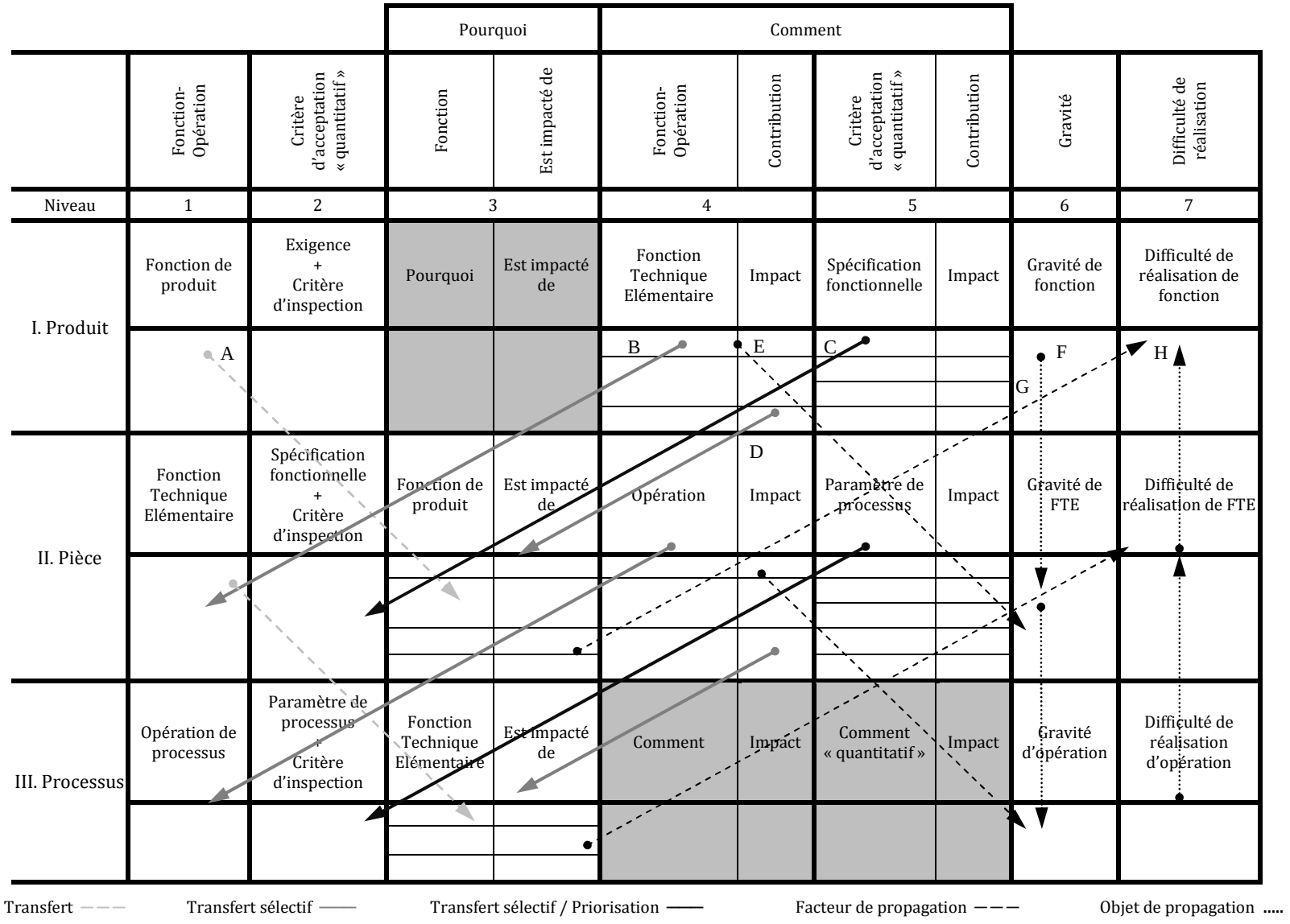
			Pourquoi		Comment					
	Fonction-Opération	Critère d'acceptation « quantitatif »	Fonction	Est impacté de	Fonction-Opération	Contribution	Critère d'acceptation « quantitatif »	Contribution	Gravité	Difficulté de réalisation
Niveau	1	2	3		4		5		6	7
I. Produit	Fonction de produit	Exigence + Critère d'inspection	Pourquoi	Est impacté de	Fonction Technique Elémentaire	Impact	Spécification fonctionnelle	Impact	Gravité de fonction	Difficulté de réalisation de fonction
						E			G E	H
II. Pièce	Fonction Technique Elémentaire	Spécification fonctionnelle + Critère d'inspection	Fonction de produit	Est impacté de	Opération	Impact	Paramètre de processus	Impact	Gravité de FTE	Difficulté de réalisation de FTE

– Propagation de la difficulté de réalisation, G, H : Idem pour le facteur de risque de difficulté de réalisation à une différence près : il est préférable de mener la propagation de ce facteur de risque d'une manière

ascendante. Comme il a été discuté en chapitre 3, la difficulté de réalisation est généralement la traduction du niveau de capabilité du processus dans l'approche proposée (il est directement lié à la fréquence d'apparition des défaillances). Il est alors plus judicieux de procéder à son estimation en partant du niveau (le plus proche) de l'analyse du processus. Dans ce cas ce qui nous permet de propager la difficulté de réalisation de l'analyse des composants à l'analyse du produit est toujours le niveau d'impact de FTE sur la fonction du produit. Ce facteur de propagation apparait en troisième colonne du tableau de l'analyse des composants (Tableau 23). La difficulté de réalisation de l'opération du processus de *« Surfacer pl100 et pl101 en ébauche »* qui affecte la fonction de corps de la pompe *« Limite le passage du fluide via les engrenages et CPHC, et le corps de pompe »* et l'impact de l'opération sur celle-ci permet d'estimer la difficulté de réalisation de FTE au niveau de l'analyse des composants.

La logique des interdépendances entre les tableaux d'ACDE et les liens de causalité existants entre les caractéristiques du produit et de ses composants décrits ci-dessus, sont également valables entre les niveaux de l'analyse des composants et l'analyse du processus. Le Tableau 24 représente une vision globale sur l'ensemble des niveaux d'ACDE et ses liens croisés « cross-links ». Ils sont de cinq natures différentes en fonction de leurs objectifs et des actions qu'ils déclenchent. Jusqu'ici une vue statique de ceux-ci a été proposée. Les deux sections qui suivent permettent une description dynamique d'ACDE par le processus de déploiement de l'outil et par les grilles de notation et de propagation.

Tableau 24. La structure globale d'ACDE



1.4. Processus de déploiement de l'outil

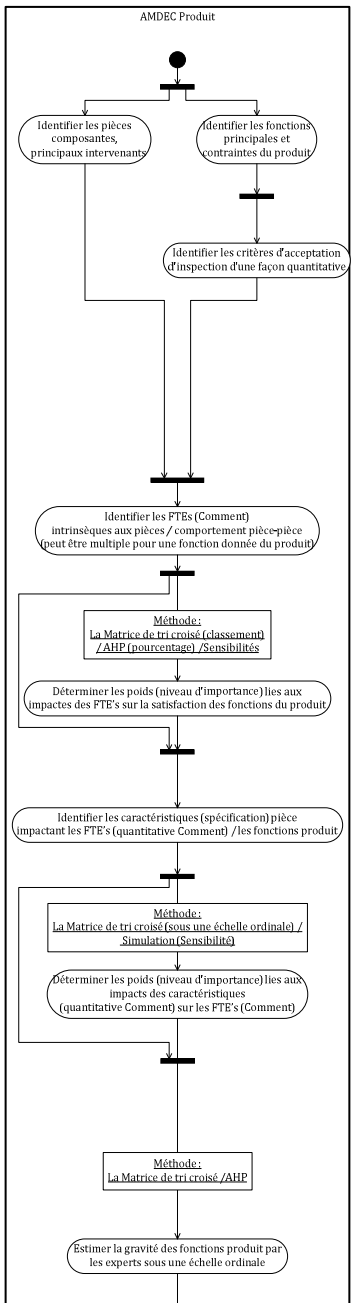
Le déploiement se décline selon trois axes : l'analyse du produit, l'analyse des composants, l'analyse du processus. Puisqu'il y a des échanges de données entre ces trois niveaux d'analyse, nous avons fait le choix d'illustrer ces échanges dans un cadre dynamique par un diagramme d'activité. Pour une meilleure compréhension, nous procédons étape par étape à l'élaboration d'un diagramme complet.

En première étape, l'analyse du produit débute par l'identification des fonctions du produit et se poursuit au niveau produit jusqu'à l'identification des spécifications fonctionnelles, en passant par l'identification des FTEs et la détermination de leurs contributions sur les fonctions du produit. Il est ensuite suivi par l'estimation de la gravité des fonctions du produit. Le diagramme d'activité de cette étape ainsi que le tableau d'ACDE concerné sont illustrés ci-dessous Figure 48. Le diagramme d'activité est extrait de la Figure 53.

La deuxième étape, consiste à transmettre les spécifications et FTEs par les liens de causalité du niveau produit au niveau composants. Nous effectuons également à cette étape la propagation de la gravité des fonctions du produit aux FTEs des composants. Le diagramme d'activité et les tableaux d'ACDE correspondants sont illustrés à la Figure 49. Chaque « couloir » de diagramme d'activité représente un tableau d'analyse d'ACDE. Nous pouvons ainsi voir les échanges de données entre les tableaux.

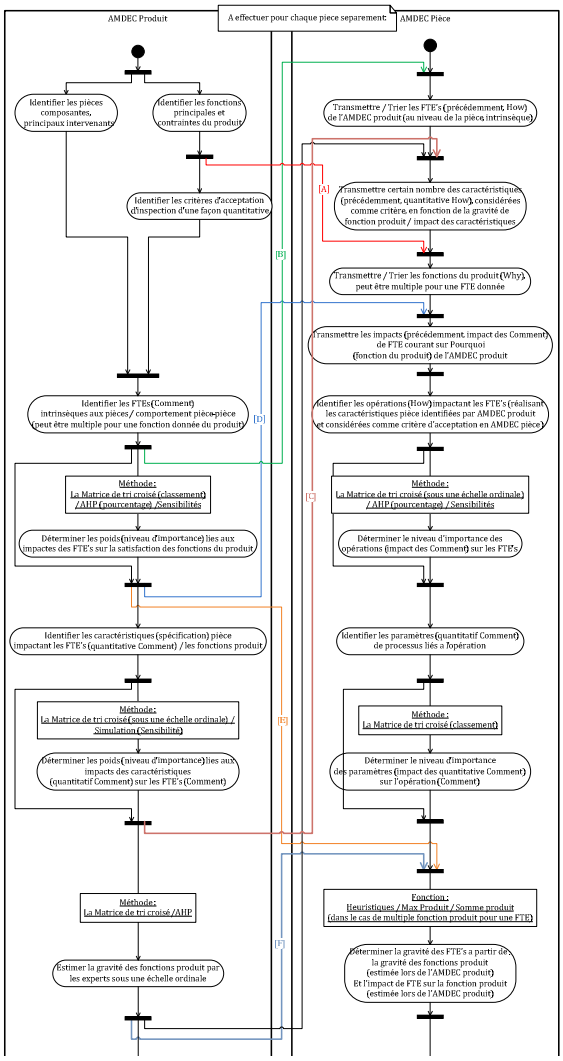
La troisième étape poursuit l'analyse par la transmission des spécifications de fabrication au niveau du processus par des liens de causalité et par la propagation de la gravité des FTEs à la gravité des opérations du processus. Puisqu'à ce stade d'analyse, les opérations du processus sont identifiées, la difficulté de réalisation de chacune doit être estimée. Le diagramme d'activité et les trois grilles d'ACDE qui correspondent à cette étape sont présentés à la Figure 50.

En quatrième et cinquième étapes, l'analyse multi-niveaux est finalisée par une propagation de la difficulté de réalisation du niveau du processus à celui des composants et ensuite au niveau du produit (Figure 51 et Figure 52). Pour une meilleure visibilité des échanges de données, le diagramme d'activité est présenté en Figure 53. Ce diagramme illustre l'interopérabilité des niveaux d'ACDE. Dans ce contexte l'interopérabilité se définit par de l'échange de données et de la propagation d'informations. Dans la section suivante nous nous intéressons de plus près à l'évaluation des facteurs de risque et aux règles de la propagation de ceux-ci.



			Pourquoi		Comment				
	Fonction - Opération	Critère d'acceptation « quantitatif »	Fonction	Est impacté de	Fonction - Opération	Contribution	Critère d'acceptation « quantitatif »	Contribution	Gravité
Niveau	1	2	3		4		5		6
Produit	Fonction de produit	Exigence + Critère d'inspection	Pourquoi	Est impacté de	Fonction Technique Elémentaire	Impact	Spécification fonctionnelle	Impact	Gravité de fonction

Figure 48. ACDE, la démarche de l'analyse des causalités au niveau du produit / l'estimation de la gravité



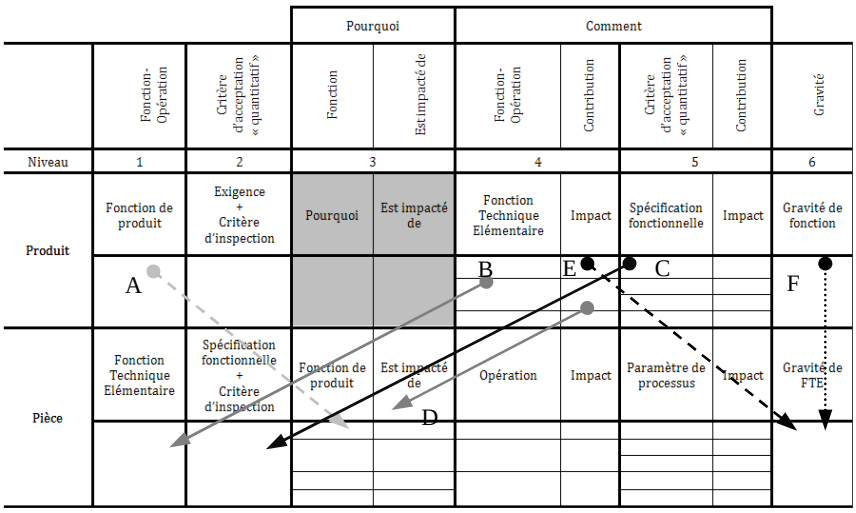
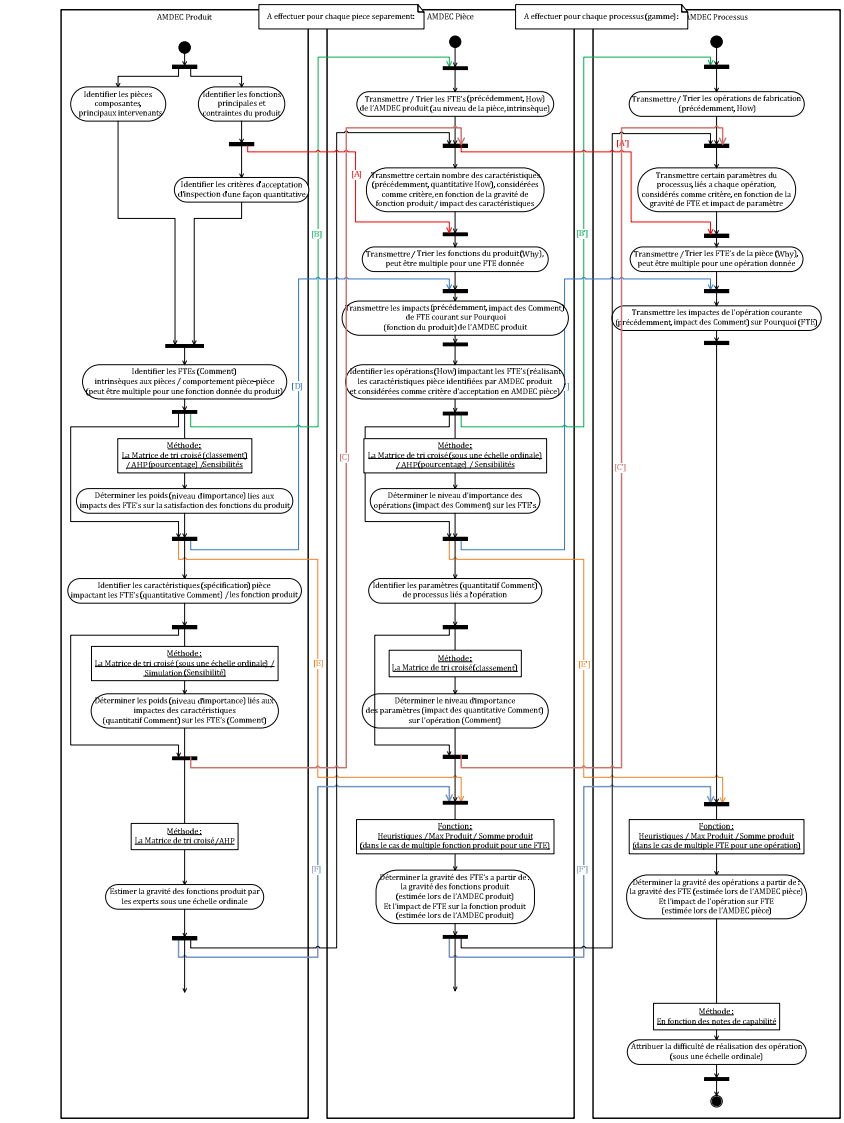
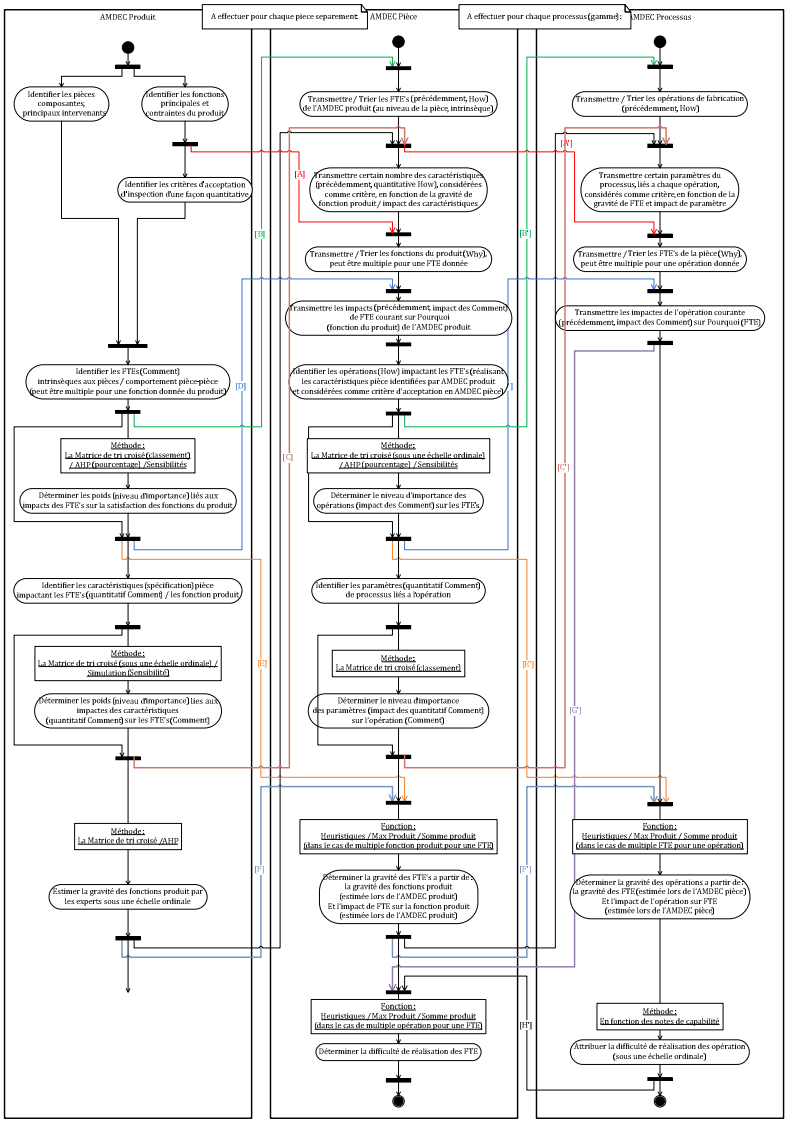


Figure 49. ACDE, l'interopérabilité des tableaux d'analyse du produit et des composants / la propagation de la gravité



			Pourquoi		Comment					
	Fonction-Opération	Critère d'acceptation « quantitatif »	Fonction	Est impacté de	Fonction-Opération	Contribution	Critère d'acceptation « quantitatif »	Contribution	Gravité	Difficulté de réalisation
Niveau	1	2	3		4		5		6	7
Produit	Fonction de produit	Exigence + Critère d'inspection	Pourquoi	Est impacté de	Fonction Technique Elémentaire	Impact	Spécification fonctionnelle	Impact	Gravité de fonction	
	A				B	E	C		F	
Pièce	Fonction Technique Elémentaire	Spécification fonctionnelle + Critère d'inspection	Fonction de produit	Est impacté de	Opération	Impact	Paramètre de processus	Impact	Gravité de FTE	
					D					
Processus	Opération de processus	Paramètre de processus + Critère d'inspection	Fonction Technique Elémentaire	Est impacté de	Comment	Impact	Comment « quantitatif »	Impact	Gravité d'opération	Difficulté de réalisation d'opération

Figure 50. ACDE, l'interopérabilité des tableaux d'analyse du produit, des composants, et du processus / l'estimation de la difficulté de réalisation



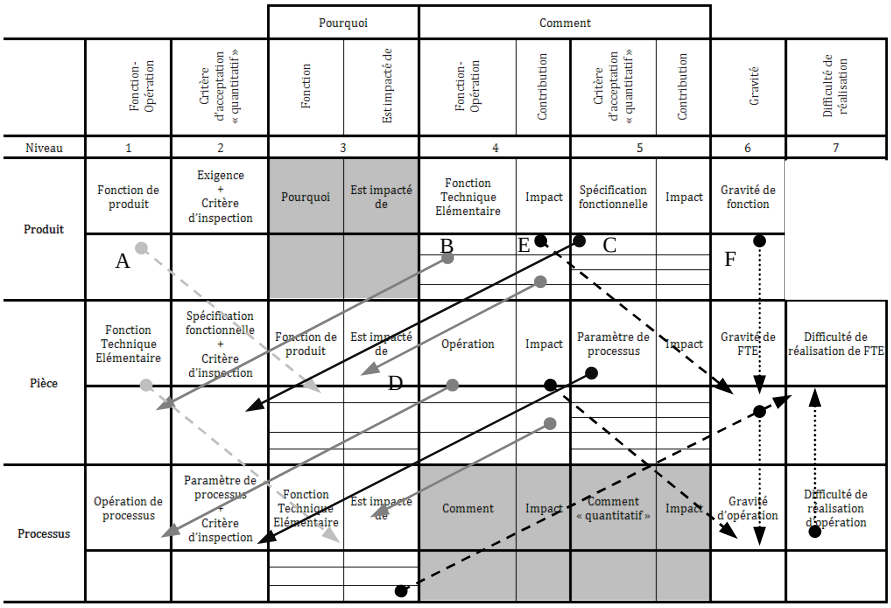
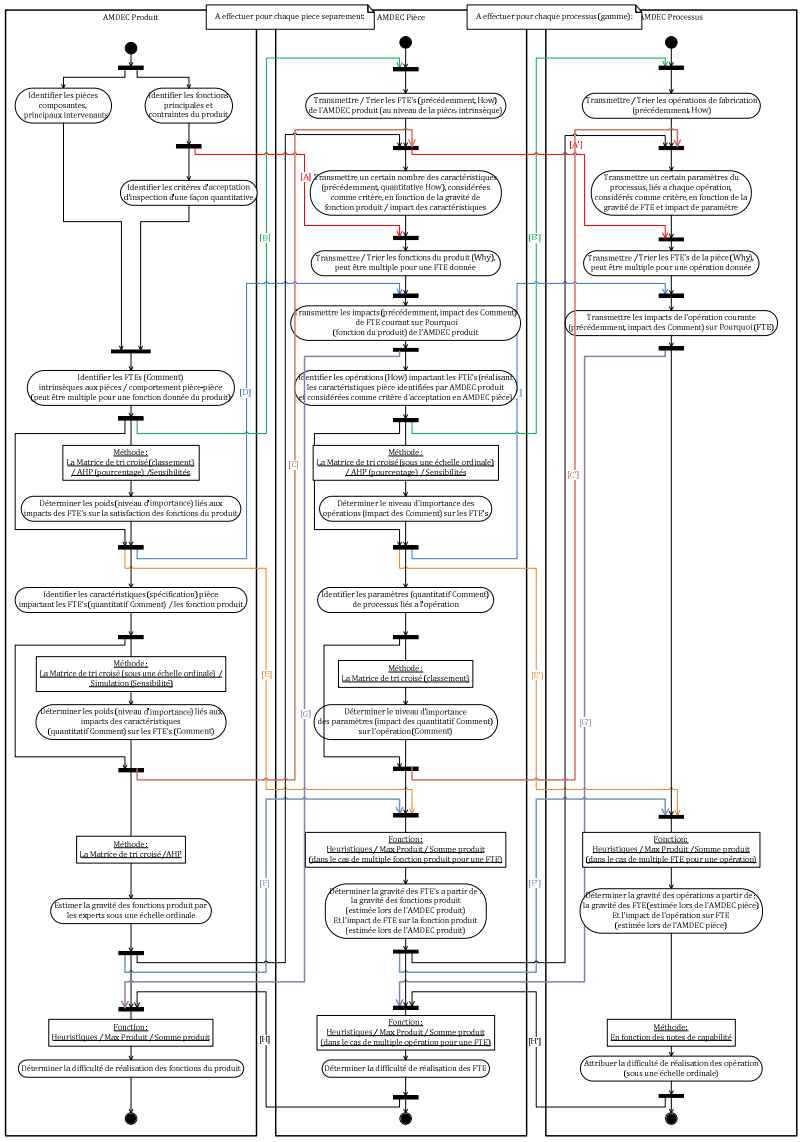


Figure 51. ACDE, l'interopérabilité des tableaux d'analyse du produit, de ses composants, et du processus / la propagation de la difficulté de réalisation



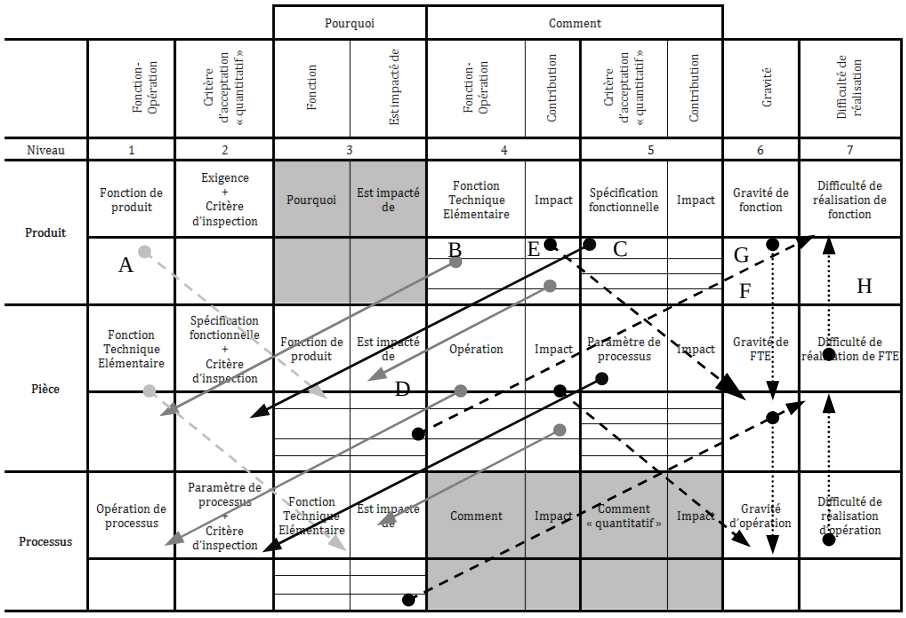


Figure 52. ACDE, l'interopérabilité des tableaux d'analyse du produit, de ses composants, et du processus

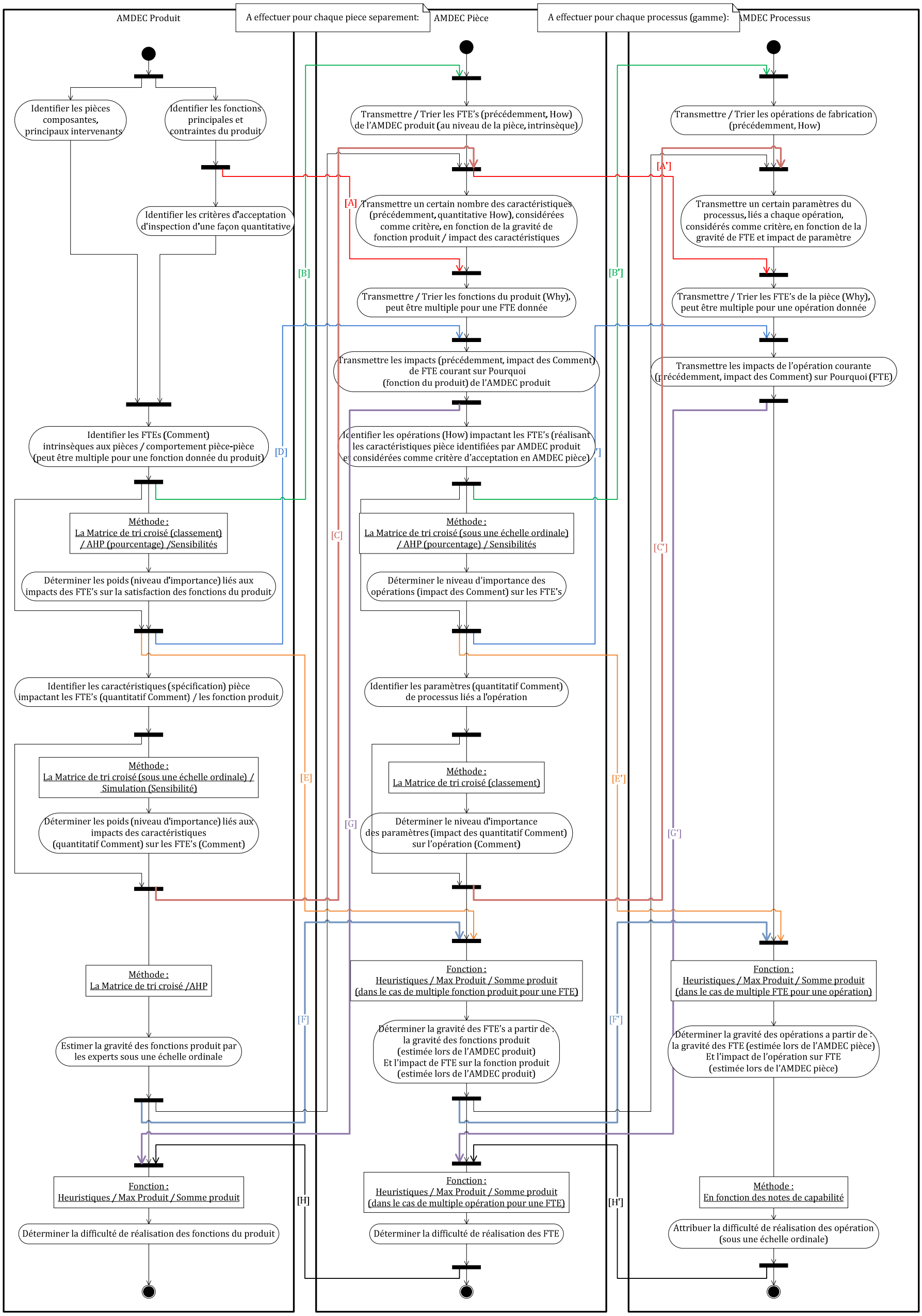


Figure 53. Diagramme d'activité d'interopérabilité des trois niveaux d'ACDE

1.5. Evaluation des facteurs de risques

Une fois le remplissage des trois tableaux d'analyse du produit, de ses composants, et du processus accompli, le savoir-faire et la connaissance fournis par des concepteurs doivent être exploités afin d'identifier les caractéristiques clés et d'attribuer leurs niveaux d'inspection (fonction du produit, FTE de pièce, paramètre de processus). Le jugement se fait en fonction de la gravité et de la difficulté de réalisation des caractéristiques. Comme cela a été discuté et illustré dans le Tableau 24, la gravité se propage en descendant les niveaux (produit, pièce, processus), tandis que la difficulté de réalisation est estimée et propagée d'une manière ascendante.

Au regard de la granularité des informations exprimées par les experts, cette propagation pourrait soit, prendre la forme des règles heuristiques pour des données qualitatives ou se baser sur des méthodes mathématiques en cas des données quantitatives. La technique de cotation est détaillée dans cette section.

Les experts sont amenés à effectuer des estimations de multiples natures à travers les tableaux d'ACDE. Par cette section l'ensemble des colonnes où une estimation doit être effectuée, et les possibilités d'extraction de la connaissance des experts, parmi celles les plus répandues sont étudiées. En règle générale, il est préférable d'avoir des évaluations ni trop imprécises, pour la crédibilité de la prise de décision finale, ni trop précises, pour la facilité de récolte des données notamment lorsque « plus de précision n'apporte rien de plus à la prise de décision ». À noter que le mode de cotation détermine le mode de propagation. Une analyse des modes de propagation permet de voir leurs avantages et inconvénients à l'égard du contexte. Le niveau élevé d'incertitudes qui pourrait être impliqué dans l'estimation des données, n'est pas sans impact sur le choix des modes d'extraction des données. Il faut faire en sorte que l'impact de ces incertitudes soit moindre.

L'une des difficultés de la propagation de la cotation des gravités entre les niveaux « produit » et « composant » est inhérente aux faits que :

- Une fonction est satisfaite par m FTEs. Comment propager la gravité de cette fonction sur chacune des FTEs ?
- Une FTE contribue à la satisfaction de n fonctions. Comment évaluer la gravité de cette FTE à partir des gravités des n fonctions ?

À la première question, plusieurs solutions peuvent être envisagées :

- Le classement des FTEs par rapport à leurs contributions relatives aux fonctions, par l'utilisation des outils d'analyse multicritères.
- L'utilisation d'une échelle ordinale.
- La normalisation des notes, qui peut favoriser par la suite une propagation mathématique pour une estimation de la gravité relative des caractéristiques du bas niveau à partir de celles déjà évaluées.

Avant d'aborder des possibilités de technique de cotation concernant l'estimation de la contribution en cinquième colonne, il faut répondre à une question : Pourquoi évalue-t-on l'impact des spécifications fonctionnelles/paramètres de processus ?

Prenons le cas d'une caractéristique donnée comme *« Limite le passage du fluide via les engrenages et CPHC, le corps de pompe »*, à qui sont associées plusieurs spécifications *« co-axialité de cercle de tête des pignons par rapport aux alésages des pignons »*, *« rectitude des axes »*, etc. Si nous ne retenons que certaines spécifications en tant que critère d'acceptation, il va falloir préciser l'impact de chacune sur la caractéristique en question. Ainsi quelle que soit la manière d'évaluer ces impacts, les spécifications ne seront transférées que si elles sont jugées « importantes » et dont l'inspection est vitale.

Cependant si la stratégie d'entreprise nous contraint d'inspecter toutes les spécifications ou paramètres qui découlent d'une FTE ou opération donnée, nous n'avons plus besoin d'évaluer ces impacts en cinquième colonne. Dans ce cas il faut uniquement lister les spécifications liées à la FTE ou les paramètres opératoires inhérents à l'opération.

Egalement une hypothèse qui pourrait être mise en place est le transfert intégral des spécifications dans le cas d'une gravité très élevée pour la fonction étudiée du produit. *« Transformer l'énergie mécanique en énergie hydraulique »* pour l'exemple de la pompe hydraulique est associée à une gravité très élevée. Pour sa FTE *« Limite le passage du fluide via les engrenages et CPHC, le corps de pompe »* au niveau de l'analyse des composants, toutes les spécifications de surface peuvent être transmises vues leurs contributions à la fonctionnalité du produit.

Il faut savoir que selon la stratégie de l'entreprise le niveau d'inspection au final peut dépendre non seulement de la « gravité » et de la « difficulté de réalisation » mais aussi du nombre de spécifications à respecter. Cette cotation permet de filtrer les spécifications à transférer au niveau inférieur. En l'occurrence par rapport au mode d'évaluation en colonne V, deux types d'estimation sont à prendre en compte :

- Une estimation précise (peut être un peu trop à ce stade de la prise de décision), qui est souvent fournie par les travaux de simulation, et qui lie les colonnes II et V (niveau de sensibilité quantitative par des relations mathématiques).
- Une estimation subjective exprimée par exemple sous une échelle ordinale, qui facilite l'utilisation de l'outil et qui ne nécessite pas des informations précises. Juste une priorisation des caractéristiques pourrait suffire pour une prise de décision plus rapide.

Pour l'estimation de la gravité en sixième colonne, se pose la question du choix de mode de notation. A savoir qu'un simple classement des fonctions produit ne suffit pas car c'est à partir de ces notes de gravité que seront calculées celles d'autres niveaux :

- Une échelle ordinale, où les notes peuvent être obtenues par exemple par la transmission des notes de hiérarchisation fournie par le TAFT.
- Une normalisation en pourcentage des notes de gravité.

Il est nécessaire pour l'homogénéisation de l'analyse, que le même type de cotation doit être maintenu par la propagation, en ce qui concerne l'expression des notes de gravité à tous les niveaux d'ACDE.

Les possibilités de techniques de cotation de la difficulté de réalisation en septième colonne sont les mêmes que celles de la gravité, auxquelles s'ajoute l'estimation numérique qui s'appuie sur les indicateurs de capabilité pour une précision (trop) élevée, et difficile à propager.

Son évaluation au niveau de l'analyse du produit, est effectuée à partir des difficultés de réalisation des FTEs qui sont de même estimées à partir de celles associées aux opérations du processus de fabrication. Ce choix est fait puisque ce facteur de risque est intimement lié à la capabilité de processus, dont des données sont souvent acquises à ce stade de la conception.

Dans l'ensemble, certains points sont à retenir :

- Il est préférable que les deux facteurs de risque : la gravité et la difficulté de réalisation aient le même type d'évaluation. Cela offre une facilité d'interprétation des données qui oriente le choix d'inspection vers le contrôle de conformité et/ou le suivi de fabrication.
- A chaque normalisation en pourcentage, l'estimation est biaisée par le nombre d'éléments.
- Des notes en pourcentage exigent une propagation mathématique, ce qui engendre la propagation des erreurs et imprécisions de l'estimation.
- Par l'ACDE proposé, les données exprimées en quatrième colonne de l'analyse du produit et de l'analyse des composants (sous forme de pourcentage ou d'une échelle ordinale) sont transmises respectivement en deuxième colonne de l'analyse des composants et de l'analyse du processus. Le même type de données est alors maintenu pour le suivi de la causalité et pour la propagation. Contrairement à la Matrice d'impact, les poids sont attribués sous une échelle ordinale aux fonctions de haut niveau alors que la contribution des caractéristiques de plus bas niveau sur la réalisation de celles-ci est exprimée sous forme de pourcentage.

Pour répondre à la question évoquée au début de cette section, la cotation d'une FTE contribuant à la satisfaction de n fonctions peut être réalisée par plusieurs mode de propagation :

- Max-produit
- Moyen-produit
- Somme-produit
- ..

La propagation par la somme-produit se caractérise par le calcul des marginales dans la littérature. Ici il est souhaité d'estimer la gravité d'une FTE à partir des gravités des fonctions du produit dont elle découle et de sa contribution à chacune d'elle. Une hypothèse que nous avons mise en place est que la gravité d'une caractéristique ne doit

pas dépasser celles des caractéristiques dont elle découle. La propagation par max-produit fera en sorte que cette exigence soit satisfaite. Autrement dit la gravité des FTEs et opérations ne doit jamais être supérieure à la gravité de la fonction du produit à laquelle elles sont attachées. Ainsi la difficulté de réalisation d'une FTE ne pourra pas dépasser celles des opérations qui contribuent à sa réalisation. Le Tableau 25 propose une brève application des liens croisés ainsi que la propagation par Max-Produit.

Malgré de multiples possibilités de techniques de cotation, nous avons fait le choix de baser toutes les estimations de risque sur une échelle ordinale pour des raisons de simplicité et de clarté, lors de l'application des heuristiques. Il est rare de disposer de l'ensemble des informations nécessaires à l'estimation du risque et de leur relation mathématique pour la propagation des risques suffisamment précises. Toutes ces heuristiques, règles, ou indications de déploiement d'ACDE sont discutés dans la section suivante.

Tableau 25. Un exemple de l'application d'ACDE

			Pourquoi		Comment					
	Fonction-Opération	Critère d'acceptation « quantitatif »	Fonction	Est impacté de	Fonction-Opération	Contribution	Critère d'acceptation « quantitatif »	Contribution	Gravité	Difficulté de réalisation
Niveau	1	2	3		4		5		6	7
I. Produit	Fonction de produit	Exigence + Critère d'inspection	Pourquoi	Est impacté de	Fonction Technique Elémentaire	Impact	Spécification fonctionnelle	Impact	Gravité de fonction	Difficulté de réalisation de fonction
	F1				FTE1	20%			60%	10.8%
					FTE2	30%				
	F2				FTE1	40%			60%	20%
					FTE3	30%				
II. Pièce	Fonction Technique Elémentaire	Spécification fonctionnelle + Critère d'inspection	Fonction de produit	Est impacté de	Opération	Impact	Paramètre de processus	Impact	Gravité de FTE	Difficulté de réalisation de FTE
	FTE1		F1	20%	Op1	50%			24%	50%
			F2	40%	Op2	60%				
	FTE2		F1	30%	Op1	100%			18%	36%
III. Processus	Opération de processus	Paramètre de processus + Critère d'inspection	Fonction Technique Elémentaire	Est impacté de	Comment	Impact	Comment « quantitatif »	Impact	Gravité d'opération	Difficulté de réalisation d'opération
	Op1		FTE1	50%					18%	60%
			FTE2	60%						
	Op2		FTE1	100%					14.4%	50%

1.6. Grilles de notation et de propagation

Pour faciliter les évaluations qualitatives des risques, il est recommandé de définir la grille d'évaluation adaptée au contexte de l'industrie (industrie automobile ...) ou le type de produit. Définir une grille idéale utilisable dans tous les secteurs semble impossible. Nous proposons ainsi certaines grilles d'estimation, adaptées à la structure et aux objectifs de l'outil proposé. Ces estimations portent sur quatre axes principaux : les grilles d'évaluation des causalités, grille d'évaluation de la gravité, grille d'évaluation de la difficulté de réalisation, et grilles de propagation. Les tableaux sont inspirés de différentes grilles (PSA, RENAULT, QS 9000, VDA, ...) proposées et analysées quant à leurs avantages et inconvénients par (Ozouf 2009).

1.6.1. Grilles d'évaluation des causalités

Les grilles d'évaluation des causalités ont pour but de faciliter et de mieux cadrer l'identification des liens de causalité et l'expression de l'importance de leur implication. Premièrement en colonne quatre la contribution des FTEs ou des opérations sur les fonctions produit ou sur les FTEs est estimée en utilisant une échelle ordinale de 1-10 (Tableau 24). Il s'agit de répondre à la question suivante : À quel point la fonction du produit/FTE est-elle influencée si la fonction de la pièce/l'efficacité de l'opération n'est pas satisfaite ? Le Tableau 26 propose la traduction linguistique des notes de contribution, et le Tableau 27 une illustration de cette estimation en quatrième colonne.

Tableau 26. La traduction linguistique de l'impact de FTE/opération sur la fonction du produit/FTE

Note de contribution	**La perception linguistique de la contribution**
1-2	Peu ou pas d'effets sur la fonctionnalité
3-4	Non-satisfaction, pourrait induire une gêne pour la fonctionnalité
5-6	Non-satisfaction, conduit parfois à une non-fonctionnalité
7-8	Non-satisfaction, empêche la fonctionnalité
9-10	Non-satisfaction, génére des problèmes de sécurité

Tableau 27. Application d'ACDE, l'évaluation de la causalité en colonne IV

1	2	3		4		5		6	7
Fonction du produit	Exigences + Critères de contrôle	Fonction (pourquoi)	Est impactée de	Fonctions Techniques Elémentaires	Impact	Spécifications pièces	Impact	Gravité de la fonction produit	Difficulté de réalisation de la fonction produit
Transformer l'énergie mécanique en énergie hydraulique	Rendement global >Min			Limite le passage du fluide entre les engrenages **et CPHC**	9	Co-axialité de cy100 avec cy102, et cy101 avec cy103 de **CPHC**	9	10	8
						Co-axialité cercle de tête des pignons par rapport aux alésages des pignons	9		

D'autres évaluations de la causalité se font aussi en cinquième colonne des tableaux d'analyse. L'objectif est de pouvoir prioriser les caractéristiques mesurables par rapport à leur importance. Ces caractéristiques sont les spécifications des composants ou les paramètres du processus. Ce niveau d'impact ne joue pas le rôle d'un facteur de propagation (contrairement à ce qui est fait en quatrième colonne) mais permet de filtrer (si possible) les critères d'acceptation dans l'objectif de limiter les activités d'inspection. Selon la stratégie d'entreprise, certaines indications sous forme de tableau peuvent être définies pour rendre cette estimation plus cohérente. Nous proposons une grille au Tableau 28, avec une application en ACDE au Tableau 29.

Tableau 28. Estimation de la contribution de Spécification-Paramètre "Comment quantitatif" sur Fonction-Opération "Comment"

Note de contribution	**La perception linguistique de la contribution**
1-2	Pas ou peu d'impact de spécification-paramètre élémentaires sur la réalisation de fonction-FTE-opération
3-4	Effet mineur sur la fonction-FTE-opération, détectable et évitable par l'opérateur, ne provoque qu'un léger inconfort
5-6	Défaillance ne survient qu'occasionnellement sur fonction-FTE-opération en raison de la non-satisfaction des limites de spécification/non-efficacité des opérations
7-8	Pièces défectueuses fréquentes en raison de la non-satisfaction des limites de spécification/non-efficacité des opérations
9-10	Pièces défectueuses en raison de la non-satisfaction des limites de spécification/non-efficacité des opérations génèrent probablement des problèmes de sécurité

Tableau 29. Application d'ACDE, l'évaluation de la causalité en colonne V

1	2	3		4		5		6	7
Fonction du produit	Exigences + Critères de contrôle	Fonction (pourquoi)	Est impactée de	Fonctions Techniques Elémentaires	Impact	Spécifications pièces	Impact	Gravité de la fonction produit	Difficulté de réalisation de la fonction produit
Transformer l'énergie mécanique en énergie hydraulique	Rendement global >Min			Limite le passage du fluide entre les engrenages **et CPHC**	9	Co-axialité de cy100 avec cy102, et cy101 avec cy103 de **CPHC**	9	10	8
						Co-axialité cercle de tête des pignons par rapport aux alésages des pignons	9		
						Diamètres des cercles de tête des pignons	9		

1.6.2. Grille d'évaluation de la gravité

La grille d'évaluation de la gravité facilite son estimation qui se fait uniquement au niveau de l'analyse du produit. La question qui doit être posée est la suivante : À quel point est-il crucial de satisfaire une fonction ? Par la grille proposée cette estimation se fait sur échelle ordinale. Le Tableau 30 présente la grille de la gravité inspirée de (Ozouf 2009). Une application est illustrée au Tableau 31.

Tableau 30. Grille d'évaluation de la gravité

Note de gravité	**La perception linguistique de la gravité**
1-2	Aucun effet/le client ne perçoit pas
3-4	Une fonction esthétique ou de bruit, l'utilisateur peut continuer à utiliser le système
5-6	Fonction secondaire, malgré le défaut, l'utilisateur peut continuer à utiliser le système
7-8	La fonction principale, conduit à une panne qui demande une intervention pour rendre le système de nouveau utilisable
9-10	Fonction de sécurité, conduit à un risque de mort ou de blessures pour les usagers ...

Tableau 31. Application d'ACDE, l'évaluation de la causalité en colonne VI

1	2	3		4		5		6	7
Fonction du produit	Exigences + Critères de contrôle	Fonction (pourquoi)	Est impactée de	Fonctions Techniques Elémentaires	Impact	Spécifications pièces	Impact	Gravité de la fonction produit	Difficulté de réalisation de la fonction produit
Empêcher toutes fuites d'huile vers l'extérieur	Mettre sous pression statique la pompe (perte maximum de pression)			Empêche le passage du fluide entre **CPHC** et le moteur	9	Rugosité et planéité de pl401 de moteur en contact avec **CPHC**	7	8	8
						Rugosité et planéité PL101 de **CPHC** en contactavec le moteur	9		
				Empêche le passage du fluide entre **CPHC** et la crépine du plan	9	Rugosité et planéité de pl200 de la crépine	7		
						Rugosité et planéité de PL100 de **CPHC** (en contact avec la crépine)	9		
Fixer et adapter la pompe sur différents moteurs	oui / non			Montabilité de **CPHC** sur le moteur	9	Parallélisme et la localisation de l'axe de cy108 et cy109 de **CPHC**	9	6	8
						Parallélisme et la localisation de l'axe de cy408 et cy409 de moteur	9		
						Planéité de pl101 de **CPHC**	7		
						Planéité de pl401 de moteur	7		
						Diamètres des axes cy108 et cy109	9		
						Diamètres des axes cy408 et cy409	9		

1.6.3. Grille d'évaluation de la difficulté de réalisation

Le niveau de la difficulté de réalisation doit être exprimé également sur une échelle ordinale, mais contrairement à la gravité, elle est évaluée uniquement au niveau de l'analyse du processus. Cette estimation se fait toujours dans le but d'identifier les caractéristiques les plus critiques. Cette évaluation peut être basée sur le niveau de la capabilité du processus tel qu'il est proposé au Tableau 32. Le Tableau 33 illustre une application de ce type d'estimation. Etant donnée la multitude des indicateurs de capabilité, un choix doit être fait pour proposer un indicateur qui reflète deux facettes, la décentration et la dispersion, toutes les deux à l'origine des éventuelles défaillances. En outre, il semble rationnel de choisir un indicateur de capabilité à long terme plutôt qu'à court terme. Les dispersions court terme ne peuvent pas être diminuées par le SPC. Il est aussi intéressant de prendre en compte le rapport entre les indicateurs court et long terme comme l'indicateur Rs (voir le chapitre 2). Cela donne une image de fréquence de défaillance ou répond à la question suivant « How often the process drifts ? ».

Tableau 32. Grille proposée d'estimation de la difficulté de réalisation au regard de la capabilité

Note de la difficulté de réalisation	**Capabilité**
1-2	Ppk > 2
3-4	1.5 < Ppk < 2
5-6	21 < Ppk < 1.5
7-8	0.5 < Ppk < 1
9-10	Ppk < 0.5

Tableau 33. Application d'ACDE, l'évaluation de la causalité en colonne VII

1	2	3		4		5		6	7
Opération de processus	Paramètres de processus + Critères d'inspection	Fonctions Techniques Elémentaires	Est impactée de	Comment	Impact	Comment (quantitatif)	Impact	Gravité d'op.	Difficulté de réalisation d'opération
Surfacer pl100 et pl101 en ébauche (2)	f_z : avance radiale	Montabilité de **CPHC** sur moteur	8					10	7
		Empêche le passage du fluide entre **CPHC** et le moteur	7						
	Vc : vitesse de coupe	Empêche le passage du fluide entre **CPHC** et la crépine	7						

1.6.4. Heuristiques de la propagation

La première estimation de la gravité au niveau du produit et celle de la difficulté de réalisation au niveau du processus, doivent être propagées aux autres niveaux. Pour cela et pour compléter l'analyse, les heuristiques et règles sont définies. Le Tableau 34 résume

les heuristiques proposées de propagation de gravité en sixième colonne (Tableau 24). Comme décrit précédemment cette propagation dépend des liens de causalité et de leur importance exprimés en quatrième colonne des tableaux d'analyse. De même, le Tableau 35 propose les heuristiques de la propagation de difficulté de réalisation en septième colonne. Cette propagation ascendante se fait également en fonction des causalités exprimées en troisième colonne des tableaux d'ACDE et leur niveau d'importance.

Tableau 34. Propagation de la gravité de la fonction, au regard des impacts associés (dégradation de la note par des heuristiques)

		Gravité des Fonction produit/FTEs					
		1	2	3-8			9-10
Contribution des FTEs/Operations (IV)	1-4	0	-1	-2	-2	-2	-1
	5-6	0	-1	-1	-1	-1	-1
	7-8	0	0	0	0	0	0
	9-10	0	0	0	0	0	0

Tableau 35. Propagation de la difficulté de réalisation (dégradation de la note de par des heuristiques)

		Difficulté de réalisation des Operations/FTEs					
		1	2	3-8			9-10
Impact reçu par des FTEs/Fonction de produit (III)	1-4	0	-1	-2	-2	-2	-1
	5-6	0	-1	-1	-1	-1	-1
	7-8	0	-1	-1	-1	-1	-1
	9-10	0	0	0	0	0	0

Suite à la proposition des grilles de notation et de propagation qui permettent le « remplissage » des tableaux d'ACDE (Voir Annexe IV), la section suivante analyse les outils d'AMDEC et de KC Flowdown en vue de proposer une synthèse des modifications qui leur sont apportée par la proposition d'ACDE.

1.7. Synthèse des apports d'ACDE

Pour faire face aux inconvénients d'AMDEC et de KC Flowdown, l'adaptation de la méthode de prise de décision globale passe par :

- Les facteurs de risque à estimer :

Comme il a été indiqué, l'activité A01 vise uniquement à identifier les KCs au niveau du produit, de la pièce, ou de son processus de fabrication et à déterminer leurs criticités. Ce n'est que lors de l'exécution des activités A02 et A03 que nous parlons d'inspection, de ses ressources, sa performance, … Nous ne prenons pas en considération les moyens

d'inspection disponibles, ni leurs niveau de précision, …. Ainsi, dans la première phase de la conception du processus d'inspection, il n'y a aucun intérêt à établir la cotation de la détection (difficulté de détection). Cette dernière doit être déterminée lors des activités A02 et A03 du processus décisionnel proposé. Une fois les KCs les plus pertinentes classées, elles indiquent la capabilité requise des ressources d'inspection et la fréquence de contrôle de conformité/suivi de fabrication nécessaire.

D'autre part, en déterminant la fréquence d'apparition de défaillance par l'AMDEC classique, nous nous intéressons en effet à la capabilité des moyens de production, qui garantissent la qualité du produit, indirectement et d'une manière non-explicite. Donc, il serait judicieux de parler de niveau de la difficulté de réalisation associée à des caractéristiques au lieu de la fréquence de défaillance. Cela s'inspire de l'esprit préventif de l'inspection (plutôt que correctif de l'AMDEC classique).

La gravité reste un facteur sur lequel la décision se fonde dans l'approche proposée. Cela peut paraitre contradictoire puisque nous revendiquons une stratégie optimiste (contrairement à l'AMDEC classique) ou le terme importance aurait plus de sens que la gravité. On maintient donc la gravité comme un facteur de risque, celle de ne pas satisfaire une caractéristique ou fonction, qui évoque à la fois l'importance des caractéristiques. Par contre le concept de gravité est utilisé en conception comme le TAFT.

A notre connaissance, la modification des facteurs de risque n'a jamais été proposée dans la littérature. Cela provient du fait que le but de ce travail (malgré certains points en commun) n'est pas celui de l'AMDEC classique. D'autant plus que nous avons décomposé la démarche en trois sous-activités différentes.

- La propagation des facteurs de risque :

L'exactitude et la précision des informations exprimées par les experts dépendent de leurs implications, de l'accessibilité de l'information, … mais elles sont toujours associées à l'incertitude. Pour surmonter ce problème, les estimations et les évaluations hasardeuses du risque doivent être réduites au maximum (Mili et al. 2009). Par l'AMDEC classique les experts sont généralement invités à (ré)-estimer les facteurs de risque à chaque niveau. Cela peut conduire à certaines incohérences entre les estimations. Nous pensons que, pour maintenir l'homogénéité des estimations des risques, une seule estimation doit être faite et propagée. La gravité estimée d'un paramètre opératoire du processus ne peut pas être insensible à la gravité d'une fonction du produit qu'assure l'opération concernée. De même la difficulté de réalisation des opérations, connaissant leur impact significatif sur les fonctions, doit nous permettre de déterminer la difficulté de réalisation des fonctions du produit.

- L'estimation du risque global :

Pour la prise de décision, l'approche classique d'AMDEC détermine l'Indices de Priorité de Risque (IPR) global basé sur la multiplication de F, G et D qui sont estimés eux-mêmes par une échelle ordinale. Cela peut générer une valeur identique d'IPR, pour différents ensemble de F-G-D. Puisque la prise de décision par AMDEC concerne uniquement

l'affectation (ou non) des actions correctives, cette note globale est suffisante. Néanmoins chaque facteur de risque et sa note associée, déclencherait une décision différente en ce qui est la planification d'inspection. Ces facteurs de risque ne doivent donc pas être agrégés. Une gravité élevée d'une fonction au niveau du produit et une fréquence faible de fréquence n'exige pas la même action que le cas contraire, ou la fréquence élevée d'apparition de défaillance demande une vigilance au niveau du processus. Par conséquent, les caractéristiques ou les fonctions à haut risque ne seraient pas prises en considération. Le niveau de risque élevé de chacun de ces facteurs devrait totalement différencier la stratégie établie. (Sankar & Prabhu 2001), (Seyed-Hosseini et al. 2006) et (Chang et al. 2009) critiquent l'estimation globale conventionnelle du risque. D'après eux les éléments d'IPR ne sont pas pondérés de façon égale l'un par rapport à l'autre en termes de risque. En conséquence, certains scénarios de (F, G, D) aboutissent aux valeurs faibles d'IPR alors qu'elles sont potentiellement dangereuses. Par exemple, le scénario (gravité très élevée, fréquence faible, difficulté de détection très faible) avec IPR de 9×3×2 = 54 est jugé non-critique face au scénario (gravité modérée, fréquence modérée, difficulté de détection élevée) avec IPR de 4×5×6 = 120 même si elle doit avoir une priorité plus élevée pour des actions correctives.

En se basant sur ces constats, on propose de juger la criticité des paramètres ou des caractéristiques en fonction du risque associé à deux facteurs séparément, premièrement pour éviter les priorités identiques malgré les niveaux différents de risque et surtout parce que chaque facteur de risque déclenche une décision différente. Le niveau élevé du risque de chaque facteur est déterminant :

- Difficulté de réalisation ; déclenche des activités de surveillance de processus
- Gravité ; déclenche des activités de contrôle de conformité des produits

- La structure et la décomposition d'AMDEC :

La structure des grilles d'AMDEC est basée sur les relations entre les causes et les effets. Cependant les questions souvent évoquées lors de la planification des activités d'inspection sont « comment » et « pourquoi » : Pourquoi est-il important d'assurer la qualité, ou de respecter les exigences par l'inspection ? Quelles sont les fonctions du produit à respecter ? Comment peut-on assurer le respect des exigences pour une caractéristique donnée ? Quelles sont les caractéristiques de plus bas niveau qui contribuent à la satisfaction de caractéristiques de plus haut niveau ? … En outre le « Comment », se décompose en deux niveaux : Description de la fonction/opération et les critères d'acceptation quantitatifs qui lui sont associés. La nouvelle structure détaillée précédemment, fait en sorte que ces questions puissent être traitées.

- La prise de décision :

Les décisions doivent être prises à l'aide d'heuristiques qui permettent d'interpréter la pertinence des facteurs dans leur ensemble. Du point de vue de la planification d'inspections, les heuristiques se fondent sur deux stratégies différentes et nous conduisent à :

- Contrôler les fonctions de haut niveau lorsque la gravité est associée à un niveau de risque élevé et la difficulté de réalisation ne semble pas être cruciale.
- Contrôler/surveiller les caractéristiques des pièces du bas niveau/des paramètres du procédé et leurs dispersions lorsque la difficulté de réalisation représente un risque élevé.

Mis à part ces cinq adaptations majeures nécessaires, il est à noter que contrairement à l'usage commun de l'AMDEC au cours de la production, qui est de mettre en œuvre les actions correctives dues à l'apparition de non-fonctionnalités, la planification d'inspection tend à l'éviter, en élaborant un plan optimal de contrôle de conformité/suivi de fabrication lors des étapes de la conception.

- Analyse des risques :

Les causes potentielles d'une non-fonctionnalité éventuelle, associées à leur importance doivent être déterminées.

- Propagation des risques :

L'imprécision des informations fournies par les experts doit être prise en compte pour la prise de décision finale. Pour répondre à cela, les niveaux des facteurs de risque sont estimés une seule fois à un seul niveau et se propagent ensuite à d'autres niveaux. D'un point de vue global (multi-niveaux) les facteurs de risque restent cohérents via la prise en compte des relations causales.

L'objectif est d'obtenir une hiérarchisation robuste des risques malgré l'incertitude épistémique dans les estimations, qui est due à un manque de connaissances du système. Elle peut être réduite en faisant davantage d'efforts par des recueils de données, consultation d'experts, … (Sallak et al. 2013). L'analyse de sensibilité atteste que l'information imprécise, mais cohérente est préférable à l'information subjective. Par ailleurs une identification peu fiable des KCs aboutit au bout du compte à un plan d'inspection inefficace.

Comme il a été abordé, l'AMDEC classique offre une structure dont l'approche d'analyse est dite, « Bottom-Up » au sein d'un même tableau. Il débute avec les modes de défaillance potentiels connues à un certain niveau et examine l'effet sur le niveau supérieur (Sharma et al. 2005). Par conséquent, une analyse complète d'AMDEC d'un système, couvre souvent tous les niveaux de la hiérarchie du processus au produit.

Cependant nous souhaitons offrir une approche qui sera pour un système dans son ensemble, « Top-Down » puisque l'intention finale se caractérise par la garantie de la qualité finale par le biais de fonctionnement. À l'inverse, l'exploitation proposée des données offre une approche à la fois « Bottom-Up » et « Top-Down ». La section suivante détaille le processus d'exploitation de ces données pour une meilleure prise de décision. Dans ce cas nous parlons des heuristiques de la prise de décision et non des heuristiques de propagation.

1.8. Procédure d'identification des KCs par l'exploitation des données structurées par l'outil

Etant donnés les facteurs de risque estimés à trois niveaux d'ACDE, l'objectif est de procéder à la prise de décision quant à la criticité des deux facteurs simultanément. En outre, cette prise de décision n'est pas locale, comme l'AMDEC classique, puisque les trois niveaux et leur relation de causalité sont pris en compte.

La prise de décision doit se faire à la fois en fonction de la gravité et de la difficulté de réalisation. La gravité à elle seule inspire le contrôle de conformité et la difficulté de réalisation dicte plutôt des activités de suivi de fabrication, tandis qu'un regard sur les deux nous oriente vers une co-conception de ces deux facettes d'un plan d'inspection.

Lors de la prise de décision nous suivons une logique dont les heuristiques peuvent prendre des formes plus ou moins différentes. D'une manière générale il s'agit de favoriser le contrôle de conformité pour des notes de gravité élevées et des notes de difficulté de réalisation au niveau faible ou moyen. Dans le cas contraire, le suivi de fabrication est indispensable. Naturellement et puisqu'on souhaite réduire les tâches d'inspection à celles nécessaires, aucune inspection n'est préconisée pour des caractéristiques associées aux facteurs de risque faibles. À noter que le but est de garantir la qualité, ce qui nous amène à recommander à la fois le contrôle de conformité et le suivi de fabrication dans le cas de la gravité et de la difficulté de réalisation élevée. Le but est d'élaborer des alternatives de la solution pour ce qui est de la sélection des caractéristiques clés, la nécessité de leur inspection, et l'attribution des activités d'inspection adéquates.

Un logigramme (Figure 54) résume la logique proposée et suivie par le développement des alternatives à partir des données extraites des tableaux d'ACDE.

Avant de procéder à la prise de décision, il est indispensable de définir des heuristiques qui lient la criticité des facteurs de risque aux activités d'inspection. C'est-à-dire qu'après avoir croisé les deux facteurs de risque, il faut associer à chaque zone de criticité, l'activité d'inspection qu'elle exige. Cette matrice de criticité est présentée en Tableau 36.

La définition des bornes peut évidemment être modifiée et adaptée au contexte. Au cours du développement des scénarios, chaque caractéristique est attachée à un « statut » parmi quatre statuts possibles (selon l'activité d'inspection exigée).

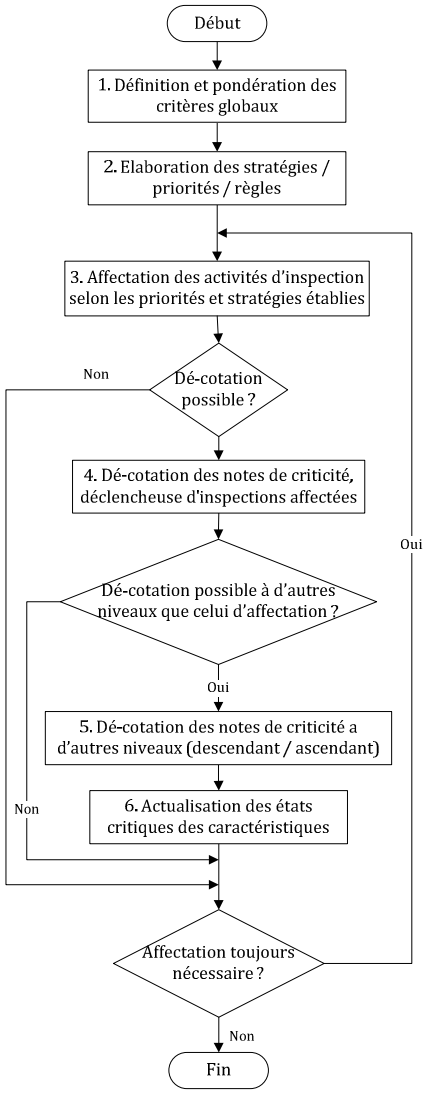


Figure 54. Logigramme d'exploitation de données extraites des tableaux d'ACDE

Tableau 36. La matrice de criticité et l'activité d'inspection exigée

		G				
		1-2	3-4	5-6	7-8	9-10
D	1-2	-			Contrôle de conformité	
	3-4					
	5-6					
	7-8	Suivi de fabrication			Contrôle de conformité et suivi de fabrication	
	9-10					

Le point de départ de la prise de décision consiste à extraire des informations sur les caractéristiques et leurs relations causales exprimées à travers trois tableaux d'ACDE.

Ceci est une forme de KC Flowdown qui facilite la visualisation des liens et l'évolution de la prise de décision (Figure 55). Les données sont extraites des tableaux d'ACDE en Annexe IV. Chacune des cases présente une caractéristique au niveau du produit, de la pièce, et du processus. Les liens entre les caractéristiques de chaque niveau et les numéros affichés sur ceux-ci, représentent des liens de causalité et des niveaux d'impact. Les notes de gravité apparaissent en haut, et les notes de difficulté de réalisation en bas de chaque case. La multitude des notes de gravité aux niveaux de la pièce et du processus, et des notes de difficulté de réalisation aux niveaux de la pièce et du produit, est due à la multitude des liens de causalité qui lie une caractéristique donnée à celles d'autres niveaux. Cependant c'est toujours la note la plus élevée que nous prenons en compte. Nous avons fait le choix de ne pas traiter deux fonctions de la pompe dans cette application, *« Echanger les calories entre l'huile et l'air »*, et *« Résister aux agressions du milieu extérieur »*.

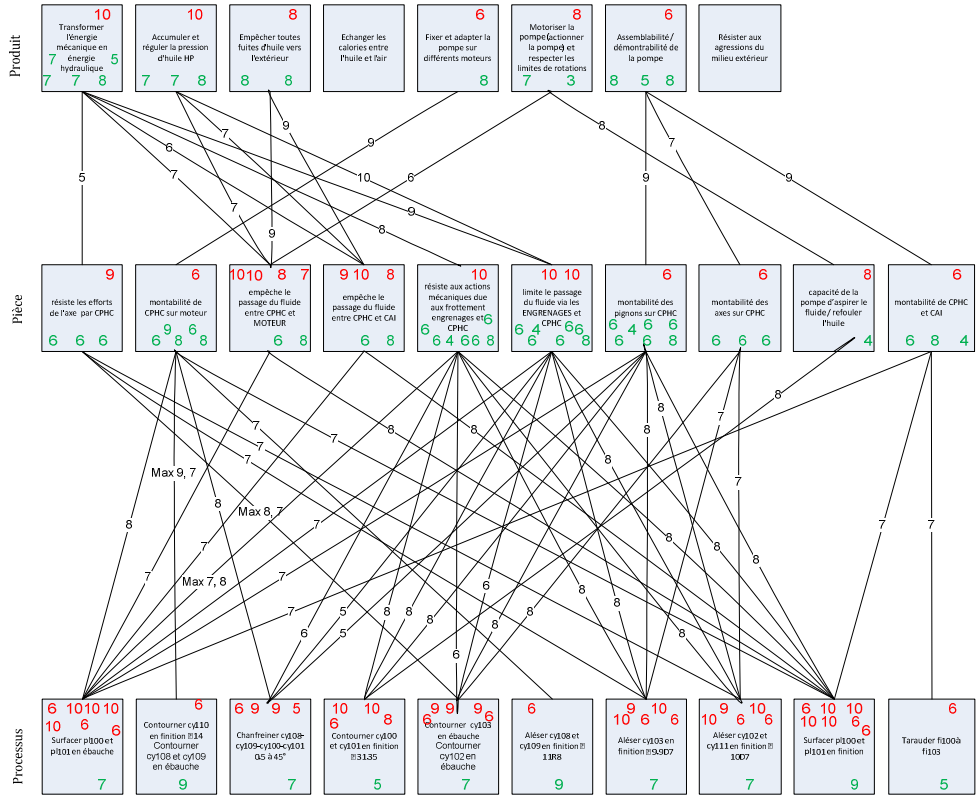


Figure 55. L'ensemble des caractéristiques et leurs liens de causalités, l'entrée de la prise de décision

Toutes les caractéristiques pourraient être potentiellement soumises à une inspection. Selon les notes de risque et sur base de la définition des statuts, un état initial du système peut être représenté (Figure 56). Selon les zones critiques du Tableau 36, les étoiles et leur couleur représente l'activité d'inspection préconisée. Cela représente uniquement des décisions dites locales sans la prise en compte des liens de causalité. Cependant la structure familière de KC Flowdown nous permet de visualiser, l'effet de ces décisions à la base locale, mais finalement avec des impacts globaux sur le système dans son ensemble. Un contrôle de conformité d'une fonction de haut niveau ne garantit pas uniquement la satisfaction du client mais peut affirmer également le bon déroulement du processus.

L'objectif attendu est d'éliminer les caractéristiques attachées aux facteurs de risque moins importants mais aussi d'éliminer les caractéristiques dont la satisfaction est confirmée et assurée par l'inspection des caractéristiques de niveau supérieur ou inférieur.

En effet pour étendre les décisions locales à celles globales, certaines stratégies et règles entrent en jeu. Une stratégie est un raisonnement ou une hypothèse, qui déclenche des règles de génération de solutions. Ces choix stratégiques sont les sous-critères, « les stratégies opérationnelles », des critères identifiés lors de l'activité A0, « les critères stratégiques » (correspond à la Figure 54, étape 1). Une règle, est à l'inverse, un mode de raisonnement général et inchangeable, une ligne de conduite pour le développement des solutions, qui ne s'active que si une stratégie est choisie. Le suivi des stratégies et des règles aboutit à de multiples alternatives de solutions. La particularité de chaque alternative est l'ensemble des stratégies qui y sont associées.

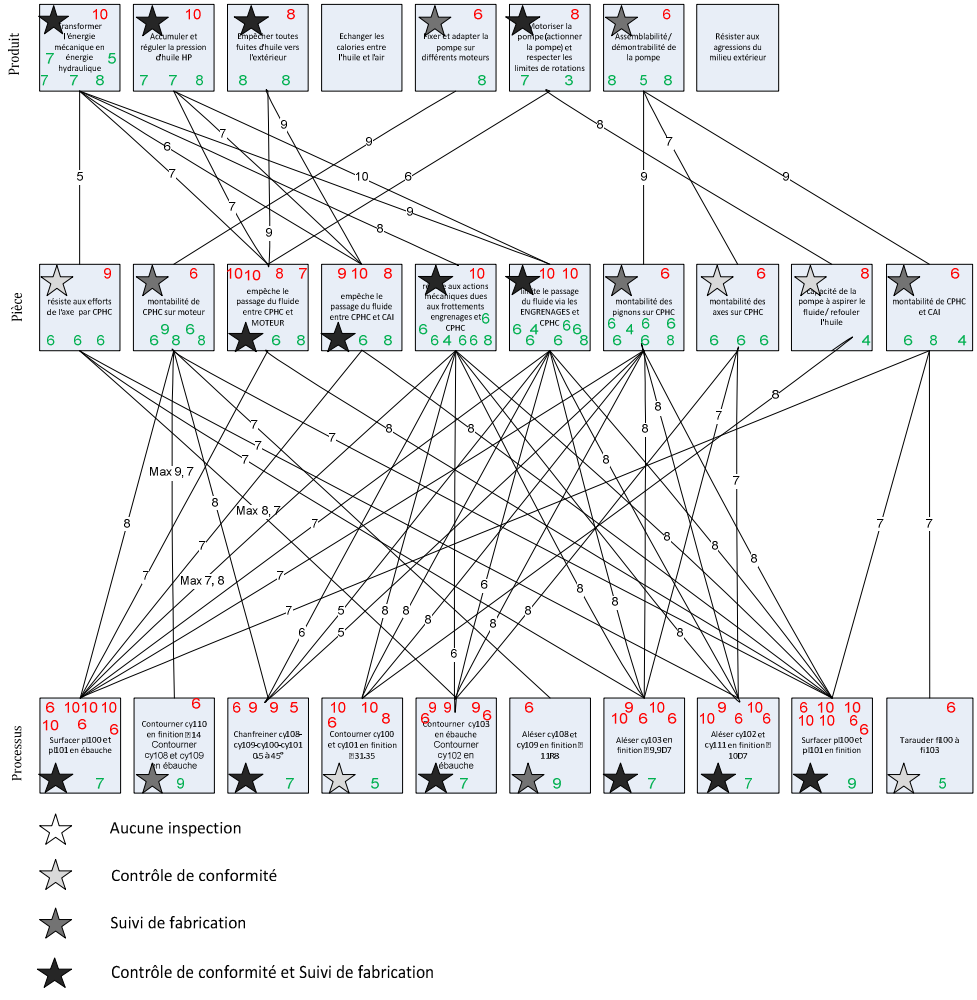


Figure 56. L'état initial de la prise de décision

Autre étape essentielle avant de procéder à la prise de décision est alors la définition des règles et des stratégies qui font avancer le développement des scénarios (correspond à la Figure 54, étape 2). Elles permettent l'affectation d'inspection et par la suite la mise à jour des statuts attachés aux caractéristiques. Nous proposons certaines définitions

(notamment pour pouvoir procéder au développement des scénarios) mais celles-ci ne sont pas exhaustives et dépendent fortement de la stratégie de l'entreprise ainsi que des critères élaborés et leur pondération : le coût, la difficulté de réalisation, la satisfaction du client.

Stratégie 0 *:* L'affectation des activités d'inspection aux caractéristiques, dont le contrôle de conformité et le suivi de fabrication sont à la fois exigés, est priorisée.

Le cas où les deux facteurs de risques prennent des notes très élevées est sans doute celui le plus critique.

Stratégie 1 : Suite à l'affectation d'inspection à une caractéristique donnée, la dé-cotation de la gravité ou de la difficulté de réalisation est effectuée.

La dé-cotation est préconisée dans le respect de critère stratégique de coût (d'inspection). Elle vise premièrement à la suspension d'une note de criticité attachée à une caractéristique, suite à l'affectation d'une activité d'inspection à celle-ci déclenchée par la note. Deuxièmement la dé-cotation concerne les caractéristiques attachées à celle affectée et leurs notes de criticités, pour une prise de décision globale (non-locale). Ces caractéristiques se situent soit au niveau inférieur de celle inspectée et sont donc « en fin de compte » vérifiées, soit au niveau supérieur et sont donc assurées par cette inspection. Autrement dit cette stratégie permet d'exploiter les causalités via la dé-cotation. La perte de criticité empêche certaines affectations d'inspection et conduit à leur réduction pour un coût moindre de l'inspection. L'application de cette stratégie est détaillée lors du développement du deuxième scenario où les notes de criticité sont en « gras » lorsqu'elles sont décotées pour un meilleur suivi.

Stratégie 2 : Suite à l'affectation d'inspection à une caractéristique donnée, aucune dé-cotation n'aura lieu.

Cette stratégie est adoptée par préconisation ou dans le respect de critère stratégique de satisfaction du client. Dans ce cas la prise de décision est uniquement locale. Pour les produits à haut risque (de sécurité par exemple), la vigilance peut mettre fin à la prise de décision à l'état initial du système (Figure 56). C'est-à-dire qu'aucune dé-cotation n'est conseillée.

Stratégie 3 : L'affectation de contrôle de conformité aux caractéristiques au niveau du produit, est priorisée.

Cette stratégie est choisie dans le respect de critère stratégique de satisfaction du client.

Stratégie 4 : L'affectation de suivi de fabrication aux caractéristiques au niveau du processus, est priorisée.

Cette stratégie est choisie dans le respect de critère stratégique de difficulté de réalisation.

Stratégie 5 : Les activités d'inspection déjà affectées peuvent être modifiées suite à une analyse des causalités.

Cette stratégie est adoptée dans le respect du critère stratégique de coût et dans le but de réduire les activités d'inspection à celles nécessaires. L'intérêt de cette itération est de réduire d'avantage les activités d'inspection. Cela se fait une fois que la première exploitation de toutes les caractéristiques est terminée. Cela est lié aux facteurs de risque qui ont été plus qu'une fois sujet à une dé-cotation : soit suite à l'affection directe d'inspection au caractéristique, soit suite à une dé-cotation (ou une affectation indirecte). Cela conduit généralement à convertir des activités du suivi de fabrication et du contrôle de conformité, en uniquement des activités du suivi de fabrication ou du contrôle de conformité. L'application de cette stratégie est détaillée lors du développement des scénarios où les facteurs de risque décotés plus qu'une fois sont soulignés pour une meilleur visibilité.

Règle 1 : **S**'il existe au niveau du processus des caractéristiques, où le contrôle de conformité et le suivi de fabrication sont à la fois exigés, **alors** ces activités d'inspection sont affectées à ce niveau, sinon au niveau des composants.

Cette affectation est restreinte aux niveaux du processus et celui des composants (contrainte de faisabilité qui empêche d'effectuer un suivi de fabrication au niveau des fonctions du produit).

Règle 2 : **Si** l'affectation est faite à un niveau donné, et qu'une dé-cotation s'impose, **alors** pour les notes de gravité elle se fait d'une manière descendante et pour les notes de difficulté de réalisation d'une manière montante.

Le raisonnement est identique à celui de la propagation. La gravité d'une caractéristique de haut niveau est à l'origine des notes de gravité des niveaux inférieurs et vice versa pour des notes de la difficulté de réalisation. Autrement dit une caractéristique perd sa note de criticité, suite à l'attribution d'une activité d'inspection à une autre caractéristique dont la note de criticité en est à l'origine.

Règle 3 : **Si** une dé-cotation est faite, **alors** est effectuée une mise à jour du statut des caractéristiques selon le Tableau 36.

Règle 4 : **Si** l'affectation est faite, et qu'une dé-cotation s'impose (descendante/montante), **alors** tous les niveaux restants (inferieur/supérieur au niveau d'affectation) doivent être parcourus à chaque étape de dé-cotation.

Règle 5 : **Si** l'affectation est faite à un niveau donné, et que la non-dé-cotation est préconisée, **alors** la prise de décision s'arrête à la première affectation.

Cette première (et en même temps la dernière selon la stratégie 2) affectation, se fait selon les facteurs de risque de chacune des caractéristiques pour une prise de décision locale qui ne prend pas en compte les causalités.

Règle 6 : **Si** le contrôle de conformité est priorisée par rapport au suivi de fabrication, **alors** sont affectées les activités de contrôle de conformité aux caractéristiques de niveau du produit, sinon des composants, sinon du processus.

Règle 7 : **Si** le suivi de fabrication est priorisé par rapport au contrôle de conformité, **alors** sont affectées les activités de suivi de fabrication aux caractéristiques de niveau du processus, sinon des composants, sinon du produit.

Règle 8 : **Si** une note de criticité décotée attachée à une caractéristique qui à déjà déclenché une affectation d'inspection, fait l'objet d'une nouvelle dé-cotation par la causalité, **alors** l'activité d'inspection affectée par celle-ci est actualisée.

C'est dans l'esprit de réduire les activités d'inspection juste à celles nécessaires.

Le développement d'une alternative passe par l'enchainement des choix des stratégies (ex. *stratégie 1* ou *stratégie 2*, *stratégie 3* ou *stratégie 4*). Chacune de ces stratégies active une ou plusieurs règles (Tableau 37).

Tableau 37. Les règles actives (ou inactives) pour chaque stratégie adoptée

		Stratégie					
		0	1	2	3	4	5
Règle	1	•					
	2		•		•	•	•
	3		•		•	•	•
	4		•		•	•	•
	5			•			
	6				•		
	7					•	
	8						•

A titre d'exemple nous suivons étape par étape le développement d'un scenario, et décryptons les choix fait lors de la constitution des branches de solution.

Suivant la stratégie 0 et la règle 1, l'affectation d'inspection (correspond à Figure 54, étape 3) débute par la confirmation des statuts qui exigent potentiellement à la fois le contrôle de conformité et le suivi de fabrication. Pour faciliter le suivi du développement des scénarios, chaque affectation d'inspection se représente par des étoiles grisées qui s'agrandissent. Suivant la stratégie 1, cela conduit à la dé-cotation des facteurs de risque à l'origine de cette affectation, c'est-à-dire la note élevée de la difficulté de réalisation et celle de la satisfaction du client (à la Figure 57 ces notes sont en gras et noir).

Selon la règle 2, la dé-cotation à ce stade n'est possible que pour les notes de la difficulté de réalisation d'une manière ascendante (correspond à Figure 54, étapes 4 et 5). Les notes de gravité au niveau du processus ne peuvent pas (plus) aboutir à une dé-cotation descendante (Figure 57). La prochaine étape consiste à mettre à jour l'état critique des caractéristiques (Figure 58) selon le Tableau 36.

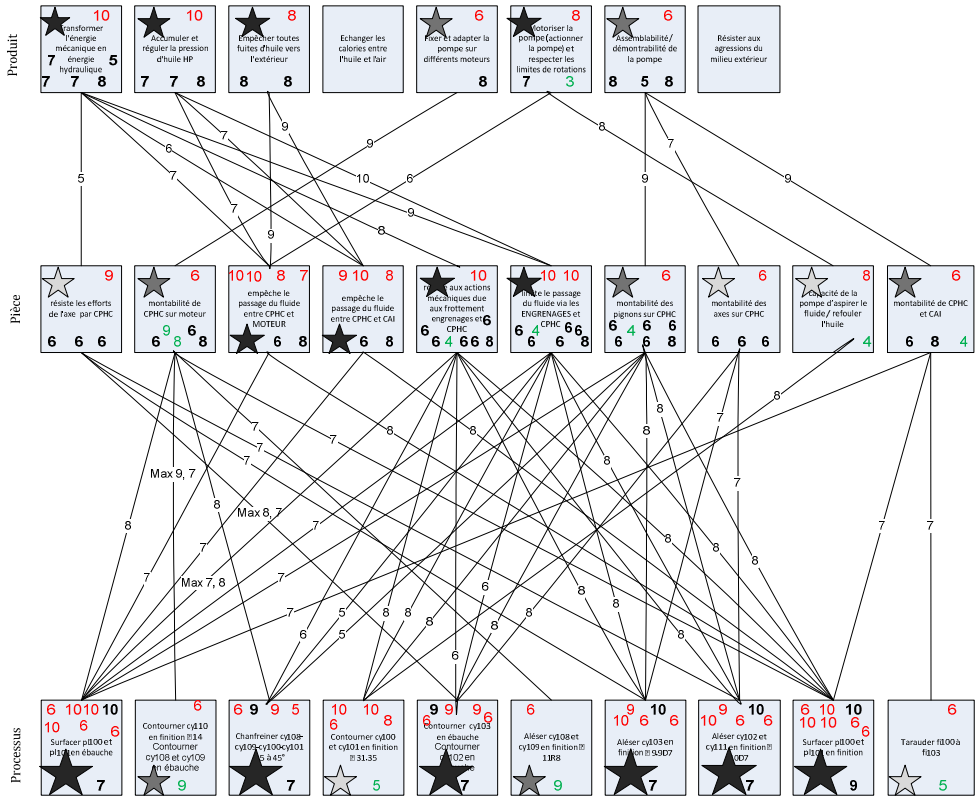


Figure 57. Procédure d'identification des KCs (Scénario 1 - I)

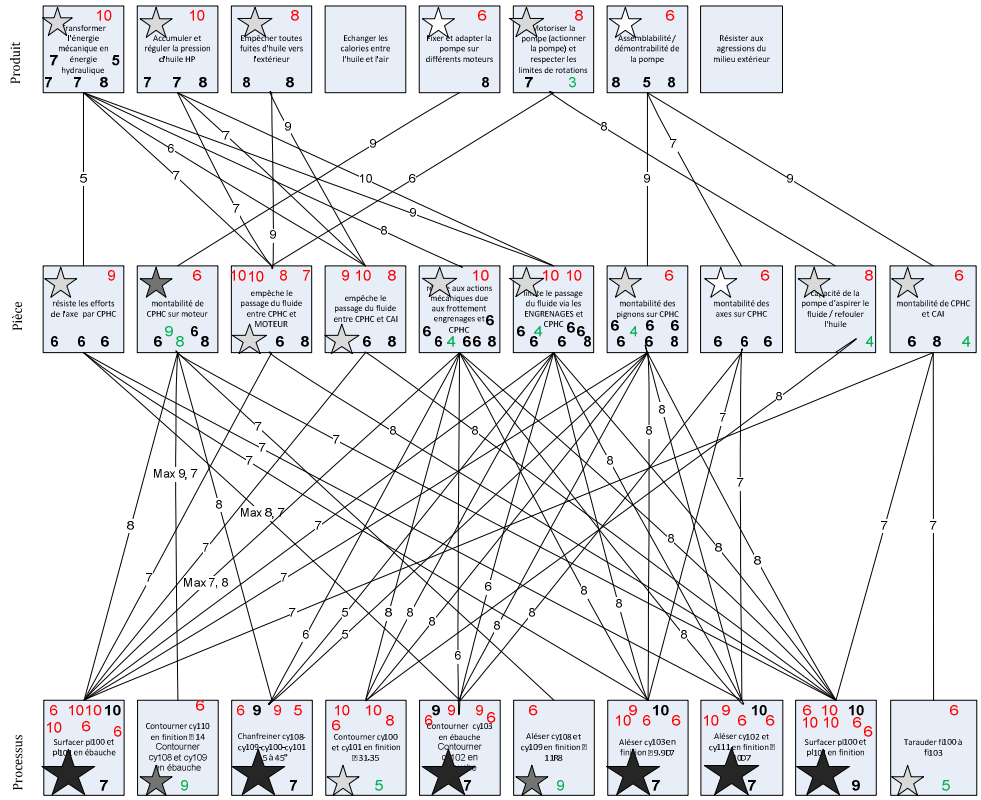


Figure 58. Procédure d'identification des KCs (Scénario 1 - II)

Selon la stratégie 3 qui privilégie la satisfaction du client, l'affectation des activités de contrôle de conformité débute au niveau du produit (règle 6). Ensuite elle entraine selon la stratégie 1, la dé-cotation des notes de gravité et ce, d'une manière descendante, comme l'indique la règle 1. La mise à jour des facteurs de risque (états critiques) des caractéristiques suite à cette dé-cotation s'impose et ce, à tous les niveaux, suivant la règle 3 et la règle 4 (Figure 59) (Figure 54, étape 6).

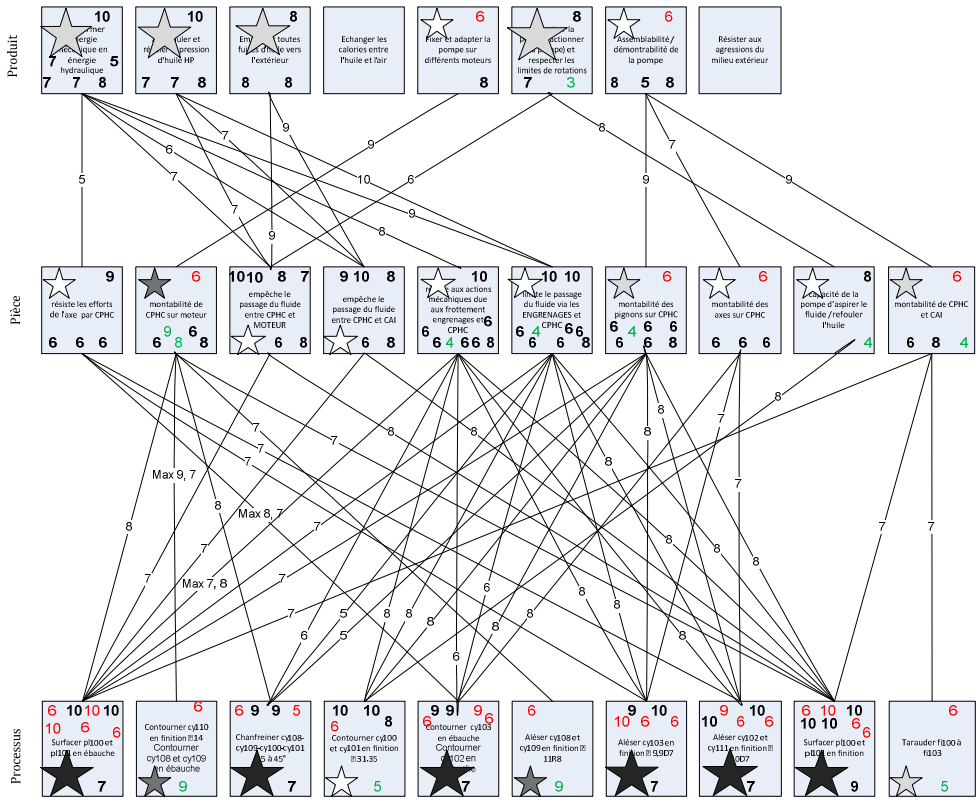


Figure 59. Procédure d'identification des KCs (Scénario 1 - III)

L'affectation d'inspection se poursuit par l'affectation des activités de suivi de fabrication au niveau du processus, suivie par la dé-cotation ascendante des notes de difficulté de réalisation et la mise à jour de la criticité selon la stratégie 1, la règle 2, et la règle 3 (Figure 60). Suite à la première affectation de contrôle de conformité et de suivi de fabrication aux extrémités (le niveau du produit pour le contrôle de conformité et le niveau du processus pour le suivi de fabrication) de KC Flowdown, généralement il reste toujours des caractéristiques critiques auxquels aucune inspection (décision) ne soit affectée. Pour les affecter, les mêmes stratégies d'affectation que précédemment choisies (privilégier le contrôle de conformité au suivi de fabrication ou vice versa) s'appliquent jusqu'à l'état où les caractéristiques sont toutes affectées ou considérées non-critiques.

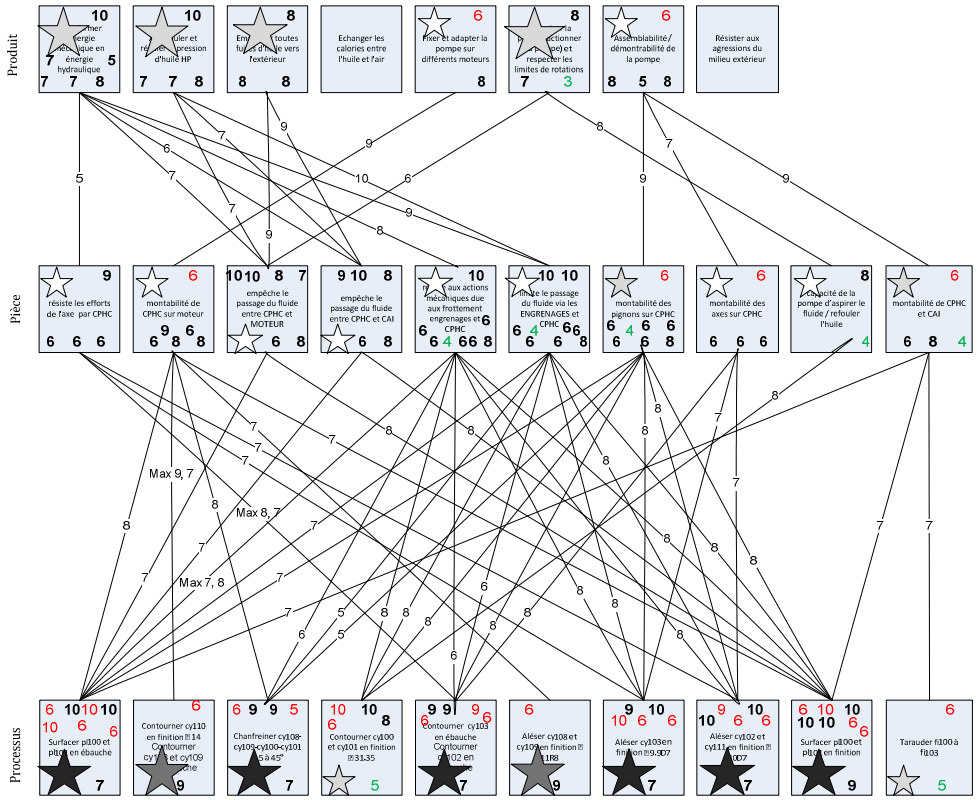


Figure 60. Procédure d'identification des KCs (Scénario 1 - IV)

Le développement du premier scenario se poursuit donc par l'affectation des facteurs de risque restants au niveau de la pièce. Selon la stratégie 3, il s'agit des activités de contrôle de conformité de la pièce (et non du processus), puisqu'il est toujours préférable d'avoir des activités de contrôle de conformité le plus proche du produit pour être certain d'assurer le critère de satisfaction du client (règle 6). Après la dé-cotation (stratégie 1) descendante (règle 2) et la mise à jour des facteurs de risque et de la criticité des caractéristiques (règles 3 et 4), il ne reste qu'un facteur de risque au niveau du processus indiquant un contrôle de conformité (Figure 61).

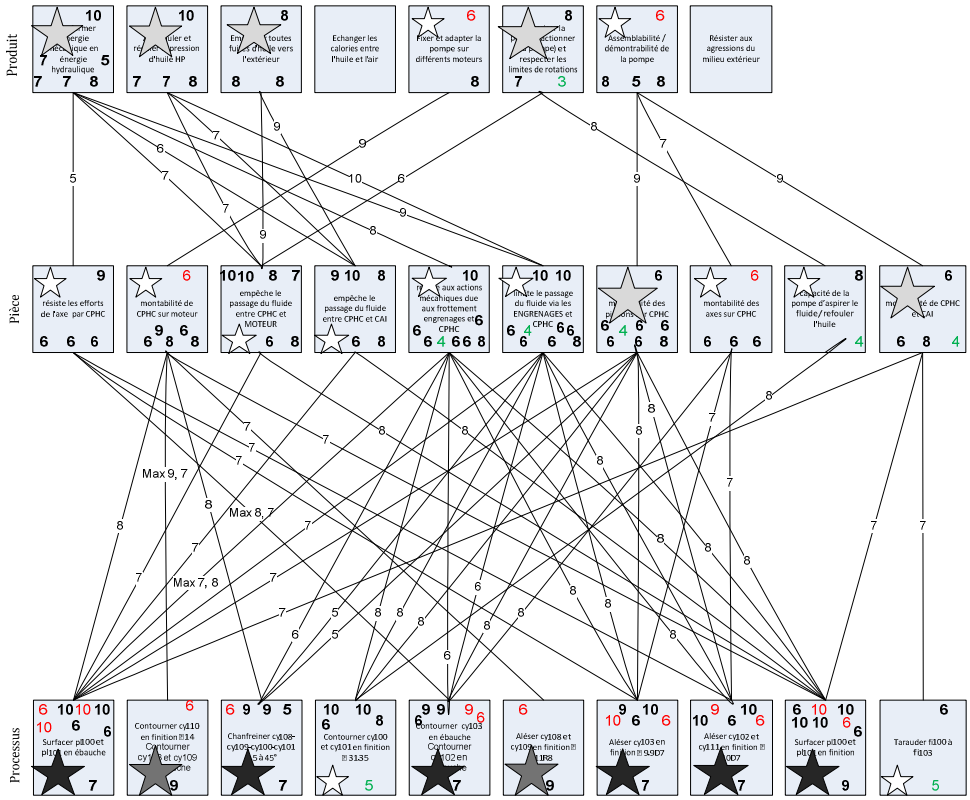


Figure 61. Procédure d'identification des KCs (premier scénario complet)

Le développement d'une autre alternative est également brièvement mis en avant, dans le but d'impliquer la stratégie 5. Il s'agit de revenir sur des activités d'inspection déjà affectées pour en réduire le plus possible (règle 8). À partir de l'état initial (Figure 56), suivant la règle 1, la stratégie 1, la règle 2, et la mise à jour des facteurs de risque des caractéristiques la Figure 58 est obtenue comme décrit précédemment. Contrairement au premier scenario, la stratégie 4 est choisie qui amène à privilégier l'affectation des activités de suivi de fabrication. Cette affectation commence au niveau du processus, et s'enchaine par la règle 2 et la stratégie 1 avec une dé-cotation ascendante des notes de difficulté de réalisation avant la mise à jour des facteurs de risque des caractéristiques (Figure 62).

Vient ensuite l'affectation des contrôles de conformité et la dé-cotation des notes de la gravité (stratégie 1) commençant au niveau du produit et d'une manière descendante (règle 3). La Figure 63 présente cette étape avant une mise à jour des états critiques. On peut constater qu'au niveau du processus certains facteurs de risque sont soulignés. Cela correspond aux notes qui ont été plus qu'une fois sujette à une dé-cotation : une fois par l'affection au niveau même du processus, et une fois par une affectation de plus haut niveau à l'origine d'une dé-cotation descendante. Suivant la stratégie 5 ces notes soulignées nous permettent de revenir sur des affectations déjà faites. Dans le cas présent il s'agit de convertir des activités du suivi de fabrication et du contrôle de conformité, uniquement en des activités du suivi de fabrication (règle 8). La Figure 64 présente cette transformation et la mise à jour des états critiques. L'affectation des facteurs de risque

restants, suivi d'une dé-cotation et mise à jour des facteurs de risque accomplissent le développement de cette alternative (Figure 65).

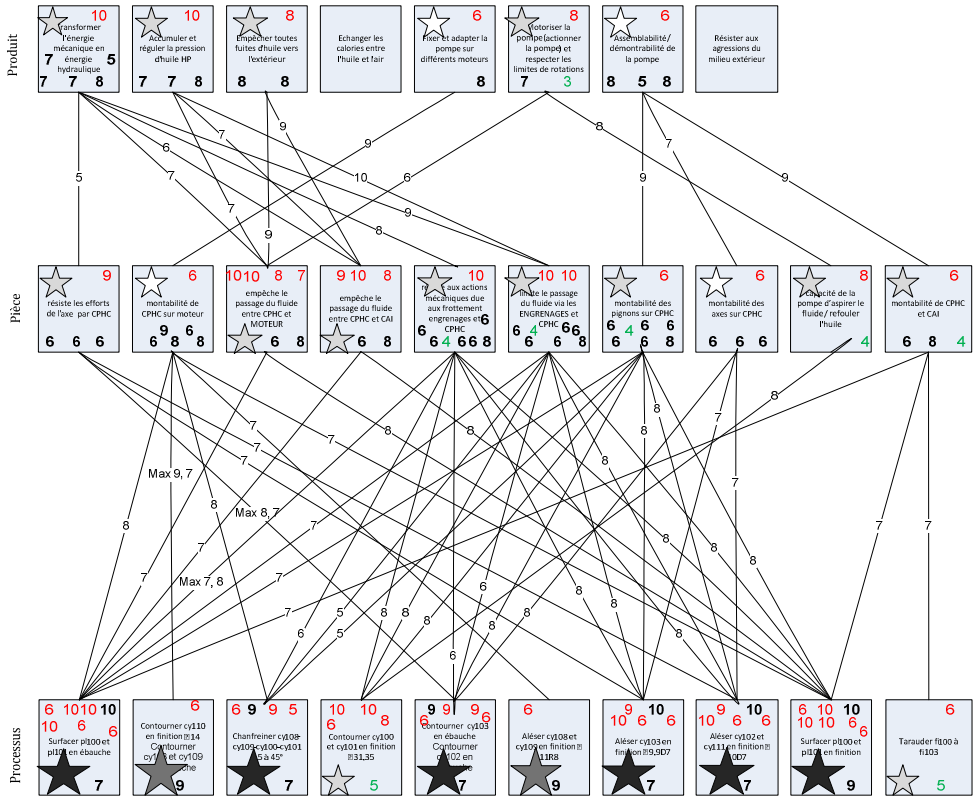


Figure 62. Procédure d'identification des KCs (Scénario 2 - I)

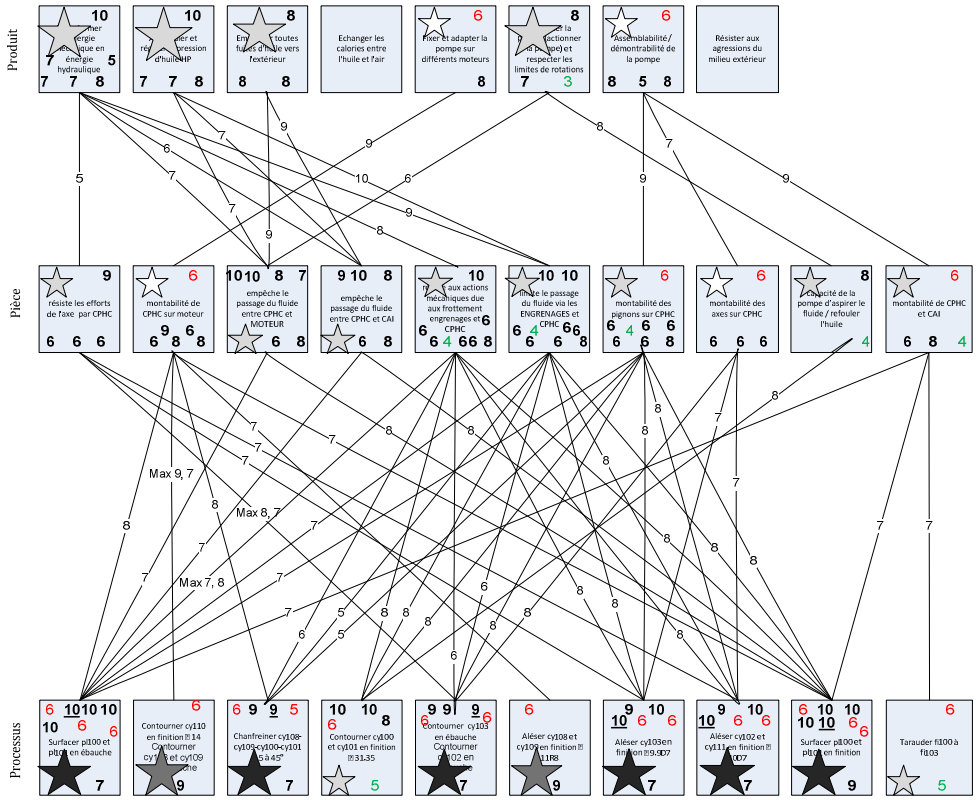


Figure 63. Procédure d'identification des KCs (Scénario 2 - II)

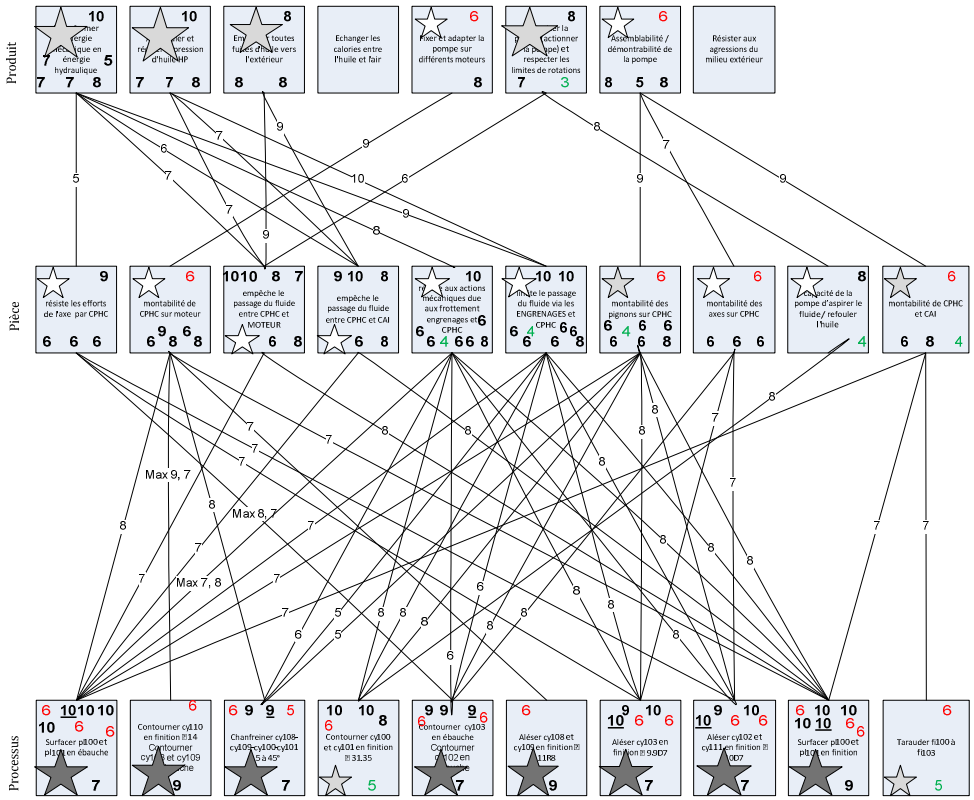


Figure 64. Procédure d'identification des KCs (Scénario 2 - III)

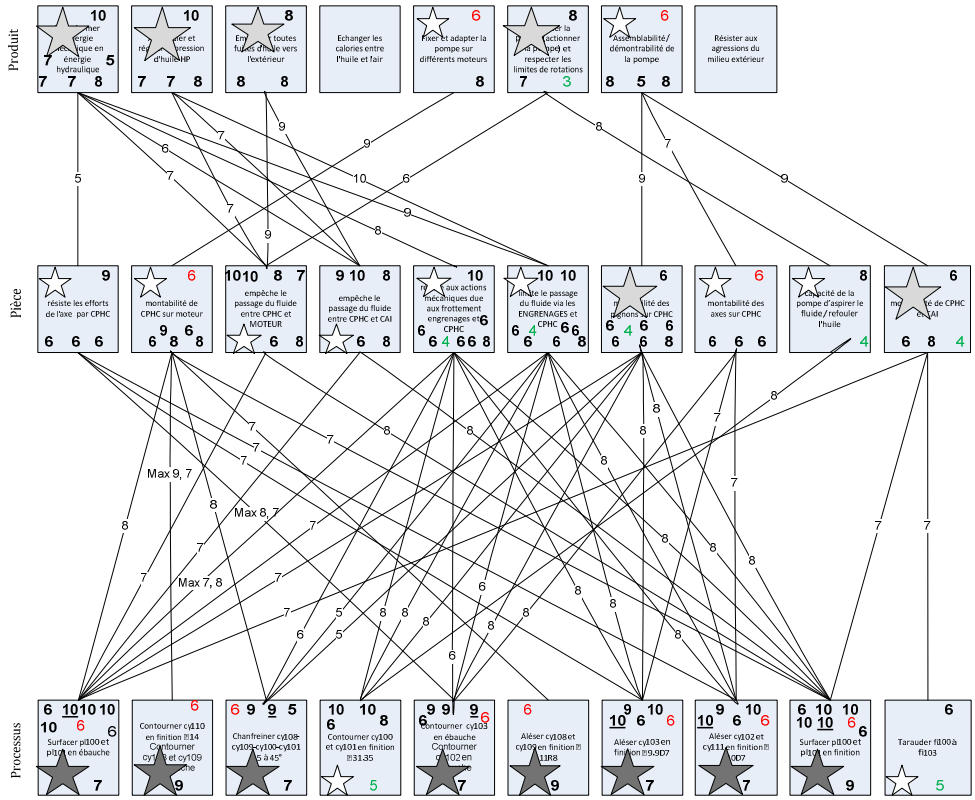


Figure 65. Procédure d'identification des KCs (deuxième scénario complet)

Jusqu'à présent l'apport principal de ce travail de recherche, notamment axé sur l'identification des KCs lors de la première activité, a été mis en avant. La section suivante propose une discussion autour des débouchés de la première activité en deuxième et troisième activités. Elle est associée à une contribution qui ouvre en même temps des perspectives à ce travail.

2. Apport (débouché) de la phase d'identification des KCs en évaluation de performance et prise de décision

Quelles que soient les alternatives de KCs et les activités d'inspection qu'elles nécessitent, la deuxième activité a pour but de proposer des moyens d'inspection appropriés. Dans ce cadre elle s'intéresse notamment à l'évaluation des performances, celles de fabrication imposées et celles d'inspection à attribuer, pour l'ensemble du système. La troisième activité de prise de décision propose par la suite des scénarios de plan d'inspection compte tenu de l'efficacité des moyens de fabrication, de l'incertitude d'inspection, de l'interdépendance des caractéristiques réalisées par des opérations, des contraintes logistiques et de faisabilité, des coûts engendrés, … Les scénarios proposés sont en effet développés par une analyse multicritères tout au long de la démarche décisionnelle. Ces critères et leurs niveaux de satisfaction y sont alors attachés.

La première étape essentielle à travers les sections 2.1 et 2.2, déterminante pour le choix final, est la définition des critères à évaluer, avant la proposition d'outils, modèles, ou méthodes d'évaluation de ces critères.

2.1. Identification de moyens d'inspection

Pour l'identification des moyens d'inspection plusieurs sous-critères se déclinent des trois critères principaux : la satisfaction du client, le coût, et la difficulté de réalisation. Ces sous-critères prennent différentes formes. Selon les informations disponibles, étant donnée la phase de la conception, ils sont soit déjà existants soit évalués ou estimés. Ces sous-critères peuvent être classés selon deux rôles au regard de la prise de décision : les contraintes ou les indicateurs de performance locaux. Notez que l'objectif final est de proposer un plan d'inspection efficace dans son ensemble, c'est-à-dire d'un point de vue global. Pour être en mesure de juger l'efficacité, les critères de prise de décision doivent être définis et figés. Ils sont parfois l'extension des indicateurs de performance locaux à l'ensemble du système.

2.1.1. La prise en compte des critères de performance des moyens de production et d'inspection

Dans un contexte de prise de décision avec multiples facettes de la performance, les critères globaux sont traduits et dispersés à travers plusieurs sous-critères, et entraînent des problèmes complexes car ils sont souvent traités simultanément. Dans le monde réel aussi les sous-critères peuvent être généralement communs entre plusieurs critères. À titre d'exemple le temps de fabrication (ou d'inspection sous forme de temps de détection) peut être classé sous le critère de coût, mais aussi peut être un indicateur pour le critère de difficulté de réalisation. Prenons le taux de non-conformité de fabrication qui contribue à l'évaluation du taux de mis au rebut, en passant par l'incertitude d'inspection (la probabilité de détection et le risque de fausse alarme). Ainsi il indique certes le niveau de la difficulté de réalisation, mais associé à l'incertitude d'inspection (le risque de non-détection) peut également être un indicateur pour la satisfaction du client.

Une analyse de la performance et ses facettes, révèle la multitude de possibilité de la décomposition des critères. La définition et la décomposition de ces critères, impact fortement la décision finale. L'évaluation des critères, relative à la granularité des informations disponibles, impacte de même la décision finale. Le regroupement des sous-critères de nature différente en un seul critère, mais aussi de multiples critères globaux en un seul indicateur est proposé en activité A02 pour mieux maîtriser ce chevauchement des sous-critères. Il est alors important de fixer une arborescence des critères appropriée au contexte, censée couvrir toutes les facettes de la performance. La Figure 66 montre l'interdépendance des indicateurs de performance et permet de s'assurer que tous les sous-critères sont observés et pris en compte, au moins une seule fois.

Face aux multiples possibilités de décomposition de critères, la définition d'un indicateur de performance globale permet de trouver le meilleur compromis (un équilibre entre les critères) pour une meilleure sélection des moyens d'inspection, alternative d'A02. Le coût semble être le critère qui traduit au mieux la performance. C'est-à-dire que mis à part la dimension purement financière du système, il donne un sens plus compréhensible par rapport a d'autres critères.

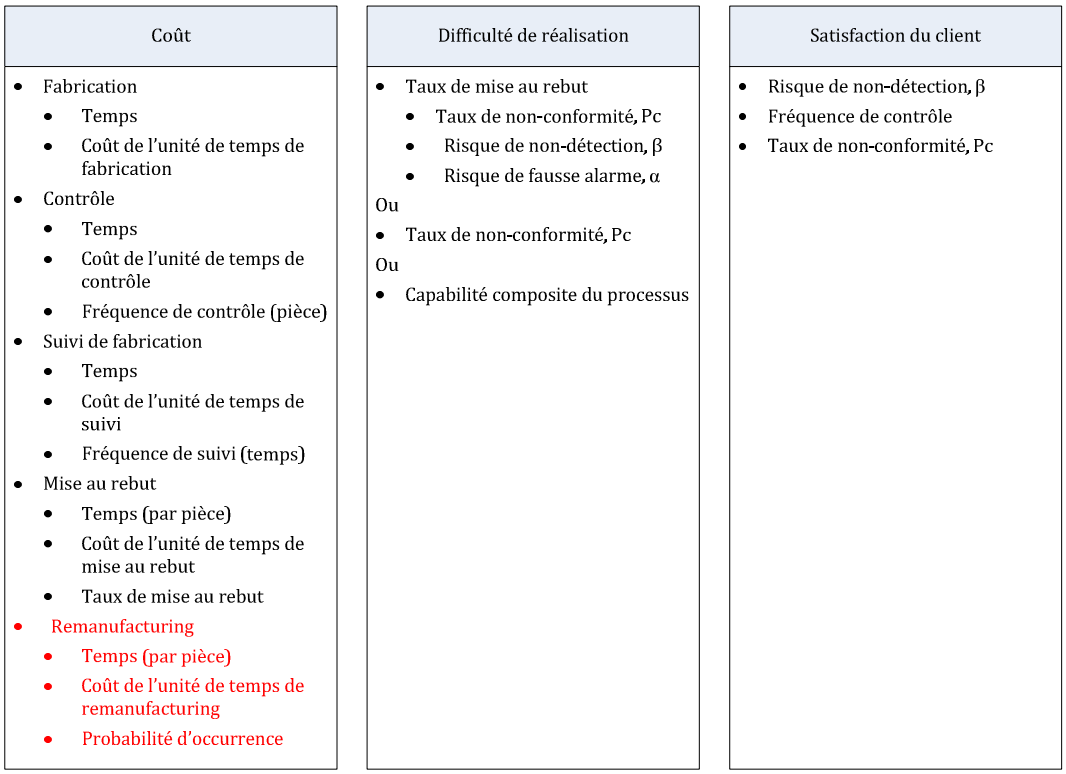


Figure 66. Une décomposition des critères globaux

2.1.2. *Activity Based Costing, pondéré qualité*

Rares sont les modèles d'estimation de coûts revus et détaillés en chapitre 2 qui ont pour but d'estimer uniquement le coût. La plupart étudie l'efficacité des solutions d'allocation des tolérances, de processus de fabrication, ou de plan d'inspection, et met en avant les origines de la non-efficacité. Ces origines sont généralement des indicateurs de performance comme par exemple le taux de non-conformité des produits, la capabilité du processus, ou le taux de produits défectueux vu par le client. Parmi les méthodes les plus répandues, les méthodes d'estimation paramétriques et analytiques ont été revues dans le chapitre 2. L'intérêt de ces méthodes est une modélisation générique rendant possible une analyse multi-niveaux par des indicateurs intervenants, et proposant un point de vue multicritères. Les méthodes analytiques, notamment ABC (Activity Based Costing), ont été retenues puisqu'elles proposent une modélisation relativement précise, flexible, et simple. A savoir qu'étant données les informations disponibles et l'objectif recherché par estimation, l'estimation des indicateurs et paramètres de modélisation de coût adopte une approche probabiliste, totalement adaptée à l'esprit analytique d'ABC.

Quel que soit l'outil ou modèle, l'évaluation de la performance dans notre approche doit refléter deux aspects : le coût et la qualité, le coût de la qualité. Pour ce faire trois besoins fondamentaux sont attendus. La méthode appliquée devrait être :

- Suffisamment précise pour fournir une évaluation de la performance proche de la réalité.
- Cohérente dans l'approche d'évaluation pour être applicable à différents stades de la conception avec une granularité variable de l'information.

- Suffisamment flexible pour être étendue aux impacts de tolérance, incertitudes de processus, et variations.

ABC semble répondre à ces exigences. Son modèle analytique, permet de s'adapter et de traiter les variations ainsi que le coût. Afin d'obtenir une expression analytique de la relation variation-coût, il est nécessaire d'extraire et de désigner l'évolution du coût à travers les activités. La méthode ABC propose de dissocier les activités et de suivre l'évolution des coûts directs et indirects. Ainsi, une vue orientée activités et une vue orientée ressources, associée au cycle de vie du produit seraient nécessaires.

Nous proposons une extension de cette méthode appelée « Quality driven ABC » (Mirdamadi et al. 2013), par lequel l'impact des incertitudes et variations, sur les coûts est pris en compte au cours des différentes phases du cycle de vie du produit : la répartition des tolérances, la planification des processus, et la planification de l'inspection. Autrement dit ce modèle établit des coûts engendrés par des décisions prises et activités lors de la conception via l'impact des variations et des incertitudes (ex. risque d'inspection).

Une vue générique regroupe les activités nécessaires à la réalisation d'un produit à partir des phases de conception et de fabrication jusqu'à la maintenance et le retrait du produit. Pour étudier l'applicabilité de l'ABC, nous menons notre étude sur certaines activités particulières qui affectent directement le coût :

- Fabrication (fraisage, forgeage, fonderie, ...)
- Reconditionnement du produit
- Réassemblage (plusieurs tentatives d'assemblage)
- Suivi de fabrication (détective/corrective)
- Maintenance du processus (régulière/préventive)
- Contrôle de conformité des produits

Hormis ces activités directes, mais naturellement liées à elles, deux autres sources importantes de charges (dépense) qui augmentent le coût final, sont dues à l'émergence de :

- Défaillance interne (recyclage des produits, ...)
- Défaillance externe (maintenance des produits, perte de clients, réclamation client)

« Quality driven ABC » vise à équilibrer le coût, et la satisfaction du client à travers l'analyse de la tolérance et des variations. Les paramètres ou inducteurs d'activité (Voir la définition en chapitre 2, section 3.8) prennent souvent deux formes différentes:

- Occurrence de l'activité : la probabilité qu'une activité ait lieu (ex. la probabilité d'une activité de reconditionnement dans le processus de fabrication).
- Efficacité de l'activité : la probabilité qu'une activité soit accomplie comme attendue (ex. la réalisation des produits conformes pour le processus de fabrication, la détection pour l'inspection).

L'analyse de la consommation et des liens de causalité permettent d'adapter l'approche classique d'ABC, à l'analyse des variations également. Ce qui est admis dans ce travail est le fait que les variations influencent particulièrement les inducteurs d'activité et donc le coût final (Équation 3), tandis que le coût et l'inducteur de ressource sont considérés constants. En d'autres termes, pour comparer la pertinence des solutions en phase de la conception, l'évolution des inducteurs d'activité influence le coût de manière significative, ce qui n'est pas nécessairement le cas pour les coûts associés à la consommation des ressources. Par conséquent, l'Équation 5 est inspirée de l'Équation 3.

Équation 5. La logique de calcul du coût pondéré qualité d'un produit par Quality-driven ABC

$$Cost = \sum Inducteur\ d'activité * Coût\ de\ Activité_Ressource$$

L'effet des inducteurs est particulièrement important lors de la conception préliminaire où les informations disponibles sur les coûts sont relativement limitées. Par cette section, l'objectif est d'anticiper la flexibilité et l'adaptabilité de cette approche en élaborant de multiples inducteurs d'activité tout au long de la conception : l'allocation de la tolérance et la génération préliminaire du plan de fabrication, l'élaboration du plan détaillé de processus de fabrication et l'allocation de ses ressources, et la génération du plan d'inspection et ses ressources. A travers ces étapes consécutives, l'objectif est de consolider la conception.

Afin d'établir un modèle générique de coût final d'un produit commercialisé chaque type d'activité doit être étudié de plus près pour identifier les coûts et les inducteurs qui lui sont liés. Il est à noter que la définition des activités et leurs inducteurs, dépend fortement du contexte. Cependant un modèle générique peut toujours servir pour une vision plus claire.

L'Équation 6 présente ce modèle qui couvre l'ensemble des activités précédemment citées, et la décomposition des critères proposée à la Figure 66. Il est constitué de plusieurs termes dont l'évolution est en fait étroitement liée. Par exemple un investissement important sur un moyen de contrôle précis peut réduire les risques de contrôle (α et β) et par conséquence le coût de la défaillance externe et interne. L'estimation de coût final est censée trouver l'équilibre entre ces termes. L'objectif est de garantir la conformité des produits aux spécifications avec un coût associé minime.

Équation 6. Le modèle générique d'ABC, pondéré qualité

$$\begin{aligned} &Coût\ Total\ du\ produit\ commercialisé \\ &= \frac{1}{\boxed{P_c\,.\,(1-\alpha)} + \boxed{(1-P_c).\beta}} \Big[C_{fab} + C_{réass}.Occ_{réass} + C_{recond}.Occ_{recond} \\ &+ C_{suivi}.Occ_{suivi} + C_{maintnc}.Occ_{maintnc} + C_{ctrl}.Occ_{ctrl} \\ &+ C_{prd\ recycl}.\left(\boxed{(1-P_c).(1-\beta)} + \boxed{P_c.\alpha}\right) + C_{prd\ maintnc}.\boxed{(1-P_c).\beta} \\ &+ \ \ldots \Big] \end{aligned}$$

Où :

- P_c : La probabilité d'occurrence du produit conforme, qui dépend des exigences du produit, les tolérances des pièces, et la dispersion des ressources de fabrication. $1/P_c$ est l'efficacité finale de toutes les activités. Autrement dit pour produire un produit conforme, il est nécessaire de produire $1/P_c$ produits. Cet inducteur reflète l'impact de l'allocation des tolérances et du plan préliminaire du processus.
- C_{fab} : Le coût de la fabrication
- $C_{réass}$: Le coût du réassemblage
- $Occ_{réass}$: La probabilité d'occurrence de l'activité de réassemblage qui dépend des tolérances des pièces, les processus d'assemblage, ainsi que les dispersions du procédé de montage (chaîne de cotes).
- C_{recond} : Le coût du reconditionnement
- Occ_{recond} : La probabilité d'occurrence de l'activité de ré-usinage qui dépend des tolérances de pièces, les ressources de fabrication, et les critères permettant de déterminer si le produit doit faire l'objet d'un reconditionnement.
- C_{suivi} : Le coût du suivi de fabrication (coût de mesure d'inspection)
- Occ_{suivi} : La probabilité d'occurrence de l'activité de suivi de fabrication, qui dépend de la stratégie d'entreprise
- $C_{maintnc}$: Le coût de la maintenance (coût de mesure d'inspection)
- $Occ_{maintnc}$: La probabilité d'occurrence de l'activité de maintenance, qui dépend de la stratégie d'entreprise
- C_{ctrl} : Le coût du contrôle (coût de mesure d'inspection)
- Occ_{ctrl} : La probabilité d'occurrence de l'activité contrôle de conformité, qui dépend de la stratégie d'entreprise
- $C_{prd\ recycl}$: Le coût de la défaillance interne (Coût d'erreur d'inspection en partie)
- $C_{prd\ maintnc}$: Le coût de la défaillance externe (Coût d'erreur d'inspection)
- α : La probabilité de fausse-alarme
- β : La probabilité de non-détection
- $\frac{1}{P_c.(1-\alpha)+(1-P_c).\beta}$: Le nombre total des produits commercialisés
  - $P_c.(1-\alpha)$: Le taux des produits conformes commercialisés
  - $(1-P_c).\beta$: Le taux des produits non-conformes commercialisés
- $(1-P_c).(1-\beta)$: Le taux des produits considérés non-conformes à raison
- $P_c.\alpha$: Le taux des produits considérés non-conformes à tort

Le modèle proposé traduit en effet l'efficacité des solutions en termes de coût, que ce soit sur l'allocation des tolérances, la génération du processus de fabrication, ou la génération de plan d'inspection. Dans ce travail de recherche, l'efficacité qu'on souhaite mesurer est celle du plan d'inspection généré, et dépend particulièrement de la performance et la précision des ressources de fabrication et d'inspection, à l'égard de la conception du produit.

Une illustration de l'emploi du modèle de coût est proposée. Par souci de brièveté et de clarté de l'application, le modèle général est appliqué sur une seule pièce, une version simplifiée d'un cas industriel vu précédemment en chapitre 2 (couvercle de l'arbre intermédiaire) (Figure 67).

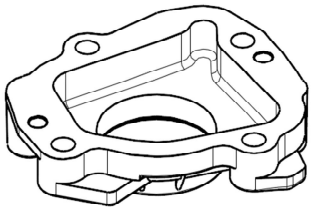


Figure 67. Vue isométrique de la pièce C.A.I.

Les informations limitées sur cette pièce ne nous permettent pas de tenir compte de toutes les activités mentionnées auparavant (Fabrication, réassemblage, suivi de fabrication, …). Le Tableau 38 récapitule les informations disponibles liées aux coûts engendrés par la production, aux probabilités d'occurrence qui sont prises en compte, et à l'émergence des défaillances internes qui provoquent l'activité de recyclage des produits en ce qui concerne cette étude de cas.

Tableau 38. Données d'entrée d'estimation de coût final sur la pièce C.A.I.

Activité	Coût associé/Pièce	Probabilité d'occurrence
Fabrication (fraisage) C_{fab}	7.62 €	-
Reconditionnement du produit C_{recond}	1.52 €	0.000008
Contrôle de conformité du produit C_{ctrl}	1.60 €	1
Recyclage du produit $C_{prd\ recycl}$	3.20 €	0.000020

Les coûts associés à l'assemblage (en cas de montage), au suivi de fabrication, et à la maintenance sont négligés (Non disponibles). Les inducteurs d'activité disponibles, nécessaires à l'estimation du coût final sont présentés au Tableau 39.

Tableau 39. Données d'entrée des inducteurs d'activité sur la pièce C.A.I.

Inducteur d'activité	Probabilité d'occurrence
Non-détection α	0.00005
Fausse alarme β	0.00005
Produit conforme P_C	0.999972

Ainsi selon Équation 6, par application des valeurs expérimentales, le coût total est égal à 9,22 €. Dans cette étude de cas, un regard de plus près sur l'évolution des coûts à travers les activités impliquées dans le cycle de vie du produit, permet de comparer les solutions proposées lors de chacune des étapes de la conception. En admettant que les tolérances appropriées soient allouées à la pièce C.A.I., l'efficacité du procédé de fabrication et le plan d'inspection doivent être discutés. Le processus de fabrication et d'inspection générés ainsi que leurs ressources semblent être une solution inefficace pour ce cas d'étude en raison de l'incertitude élevée, et la fréquence maximale de l'inspection. Il serait préférable d'équilibrer la contribution de coût de la fabrication et de celui de l'inspection. Ainsi la flexibilité du modèle proposé, la facilité d'apporter une synthèse sur les coûts engendrés par de multiples décisions, et l'utilité d'associer l'estimation des coûts avec les inducteurs d'activité (probabilité, incertitude, ...) ont été mis en avant.

Par conséquent les décisions prises dans les différents stades de la conception, impactent d'une manière significative le coût final, par les inducteurs d'activité, ou le choix des ressources d'activités. Indépendamment de l'étape de conception, de ses objectifs, et de la précision des informations, il est nécessaire d'évaluer la pertinence de solutions de conception. ABC pondéré qualité semble être suffisamment souple pour impliquer les variations dans le modèle analytique, même si cet aspect n'est pas traité par l'approche originale. Cette capacité à évaluer un coût relatif à différents stades de la conception, est intéressant car cet indicateur de performance pourrait être la fonction objective d'une optimisation. Combiné avec un algorithme complet pour la génération du processus de fabrication et d'inspection, cet indicateur de performance permet de concevoir le « meilleur » processus d'inspection.

Le développement de cinq scénarios est proposé via une simulation multicritères relativement simple d'un système de production (l'usinage du corps de pompe) (Figure 68 et Figure 69).

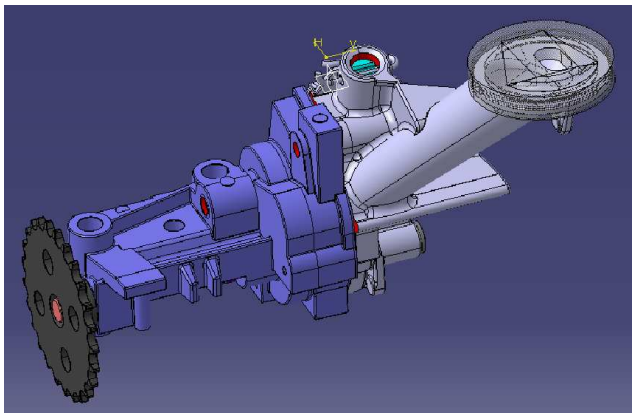


Figure 68. Vue d'ensemble de la pompe

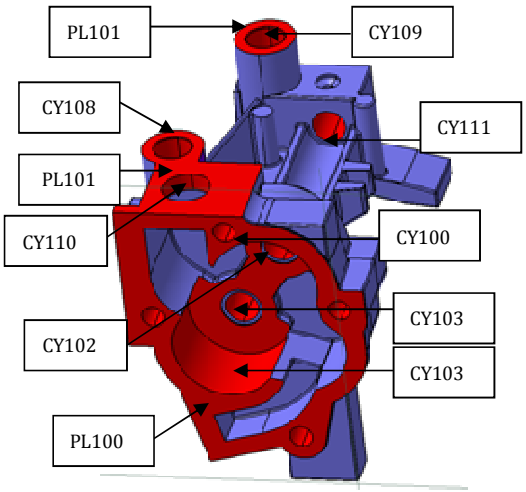


Figure 69. Définition des entités à usiner sur le corps de pompe

Nous mettons ainsi en application la proposition de l'activité A02 pour l'évaluation des critères. Les mêmes scénarios associés à leurs critères de décision, seront en perspective utilisés par l'activité A03 pour l'application de la prise de décision finale. Le

Tableau 40 résume les données d'entrée nécessaires pour cette simulation de 15 opérations sur 100000 pièces de départ (suite aux activités de détection de défaillance et de mis au rebut, le nombre de pièces restantes sera différent). Nous y voyons également le taux de non-conformité calculé en fonction de la capabilité des opérations et des activités de suivi de fabrication.

Tableau 40. Extrait des données d'entrée des opérations d'usinage du corps de pompe

Désignation des opérations	***Capabilité d'opération***		***Temps de station d'opération***	***Taux de non-conformité obtenu***	
	Cp	***Cpk***		***Avec suivi de fabrication***	***Sans suivi de fabrication***
Surfacer PL100 en ébauche	*2*	*1.5*	*0.148*	*0 ppm*	*7 ppm*
Surfacer PL101 en ébauche	*2*	*1.5*	*0.166*	*0 ppm*	*7 ppm*
Finition CY110	*2*	*1.66*	*0.133*	*0 ppm*	*1 ppm*
Ebauche CY108 et CY 109	*1.6*	*1.33*	*0.154*	*2 ppm*	*66 ppm*
Chanfreiner CY108 et CY109 à 45°	*2*	*1.66*	*0.090*	*0 ppm*	*1 ppm*
Chanfreiner CY100 et CY101 à 45°	*2*	*1.66*	*0.251*	*0 ppm*	*1 ppm*
Alésage CY100 en finition	*1.5*	*1.2*	*0.257*	*7 ppm*	*318 ppm*
Alésage CY101 en finition	*1.5*	*1.2*	*0.257*	*7 ppm*	*318 ppm*
Ebauche CY102 et CY 103	*1.66*	*1.3*	*0.122*	*1 ppm*	*96 ppm*
Ebauche CY111	*1.66*	*1.4*	*0.109*	*1 ppm*	*27 ppm*
Finition CY108 et CY 109	*1.66*	*1.4*	*0.134*	*1 ppm*	*27 ppm*
Finition CY102 et CY103	*1.3*	*1.1*	*0.122*	*96 ppm*	*967 ppm*
Finition CY111	*1.3*	*1*	*0.122*	*96 ppm*	*2700 ppm*
Surfacer PL100 en finition	*1.66*	*1.33*	*0.117*	*1 ppm*	*66 ppm*
Surfacer PL101 en finition	*1.66*	*1.33*	*0.129*	*1 ppm*	*66 ppm*

Le Tableau 41 résume la description des cinq scénarios et le niveau des critères qui y sont attachés. Comme il a été discuté auparavant, ces estimations globales ne sont possibles que par le biais des indicateurs de performance locaux tels que l'indicateur de capabilité, ou des inducteurs d'activité comme l'incertitude d'inspection pour l'estimation de coût (Équation 6). Il est à noter que certains critères peuvent être évalués de multiples façons (ex. qualitative ou quantitative).

Cependant quelle que soit la nature des critères associés aux alternatives de l'activité A02, l'activité A03 doit proposer par la suite la meilleure solution qui est optimale dans son ensemble aux vues des trois critères. Ce qui fait apparaitre des perspectives de ce travail de recherche. L'enjeu est l'agrégation des trois critères quel que soit le type d'évaluation : la satisfaction du client, le coût, et la difficulté de réalisation (Mousavi et al. 2014).

Tableau 41. Description des scénarios

Description des scénarios (A)	*Coût (€)*			*Difficulté de réalisation*		*Satisfaction du client*
	Productif	*Non-productif*	*Total*	*Pièces défectueuses (détectée ou non)*	*Capabilité total*	*Pièces défectueuses vues à l'extérieur*
Attribution d'une seule et unique activité de contrôle de conformité en fin de chaine, à 100% de fréquence	*0.6733*	*0.1846*	*0.8579*	*0.00467*	*1*	*100 ppm*
Attribution des activités de suivi de fabrication aux opérations de capabilité Cp<1.6, à une fréquence donnée (100 minutes)	*0.6732*	*0.0014*	*0,6746*	*0.00057*	*1.3*	*570 ppm*
Attribution d'une seule activité de contrôle de conformité en fin de chaine, à 100% de fréquence Et Attribution des activités de suivi de fabrication aux opérations de capabilité Cp<1.6, à une fréquence donnée (100 minutes)	*0.6733*	*0.1819*	*0.8552*	*0.00057*	*1.3*	*10 ppm*
Attribution des activités de contrôle de conformité, à 100% de fréquence à la fin de chaque opération de capabilité Cpk<1.4	*5.4939*	*14.4263*	*19,9202*	*0.00556*	*1*	*130 ppm*
Attribution des activités de contrôle de conformité, à 100% de fréquence à la fin de chaque opération de capabilité Cpk<1.4 Et Attribution des activités de suivi de fabrication aux opérations de capabilité Cp<1.6, à une fréquence donnée (100 minutes)	*5.4941*	*10.8338*	*16,3279*	*0.00345*	*1.3*	*90 ppm*

Bien que nous avons proposé deux différentes façons d'exprimer la difficulté de réalisation, le résulta de cette agrégation selon deux modèles d'agrégation différents est le classement suivant : A3, A1, A2, A4, A5.

2.2. Perspectives de recherche pour l'identification de la fréquence d'inspection/les points d'insertion des activités d'inspection

Les techniques de prise de décision peuvent regrouper non seulement les sous-critères de natures différentes en un seul critère, mais aussi agréger de multiples critères, étant donné leur poids, en une **note d'adéquation** globale pour chaque solution associée aux critères. Les critères contradictoires (avec des sens d'évolution favorables différents) qui contribuent à la performance globale font partie de tout système de fabrication. En ce qui concerne la planification d'inspection, une solution adéquate serait celle qui satisfait les objectifs industriels contradictoires, de natures différentes, et donc estimés de façons différentes. Cette problématique peut être vue dans le cadre d'un « Multi-attributes decision making » (MADM). À savoir que la granularité des informations fournies par les

experts limite le choix de la méthode de la prise de décision, et est déterminante en ce qui concerne la rapidité de développement des solutions. La proposition d'un classement robuste des alternatives de solution, malgré les informations quantitatives et qualitatives, nécessite une revue de la littérature sur les techniques de la prise de décision.

La prise de décision multi-attributs, est le processus de recherche de la solution la plus appropriée parmi toutes les alternatives possibles pour des problèmes d'évaluation et de sélection. La complexité grandissante de l'environnement de fabrication, empêche les experts de prendre en compte toutes les propriétés du problème d'évaluation et de sélection (Mojtahedi et al. 2010) (Mousavi et al. 2012). En l'occurrence ils ne peuvent pas fournir la performance de chaque solution en ce qui concerne l'importance relative de chaque attribut par des valeurs précises. En fait, la connaissance présentée par les experts serait des jugements imprécis ou incomplets (exprimés d'une manière linguistique) plutôt que des valeurs exactes et numériques. Par conséquent, les méthodes de prise de décision multi-attributs pourraient aller jusqu'à envisager des situations incertaines dans la vie réelle. Ces méthodes de prise de décision sous incertitude ont été largement répandues dans l'environnement de fabrication, par exemple, la sélection de politiques de maintenance, et l'évaluation des systèmes flexibles de fabrication (Vahdani et al. 2013).

Conclusion

Bilan des travaux

Au terme de ce travail, nous nous proposons de rappeler la problématique, les objectifs, et la méthodologie de recherche suivie. Un bilan de ce qui a été réalisé et apporté en réponse aux attentes, est ensuite établi.

A ce stade la problématique peut être reformulée ainsi :

*« Comment générer un plan d'inspection **optimal** par une prise de décision multicritères, via la co-conception des activités de **contrôle de conformité** du produit et de **suivi de fabrication** du processus, à l'égard des **objectifs stratégiques** par des **indicateurs de performance** ? »*

A l'issue du premier chapitre, le contexte global a été introduit notamment par la définition des concepts relatifs à ces travaux et leurs interactions, résumés en un schéma conceptuel. Cela nous a permis de justifier le rôle de l'inspection des caractéristiques pour garantir la qualité. Le concept d'inspection se décline en deux facettes perçues par les industriels : le contrôle de conformité du produit et le suivi de fabrication du processus. Ils reflètent les objectifs opérationnels d'un plan d'inspection. Pour optimiser ce plan d'inspection nous nous sommes intéressés à leurs objectifs stratégiques : le coût, le risque, …. Ces objectifs sont finalement communs entre ces deux activités d'inspection. Cela nous a conduits à envisager une mise en relation et donc une génération simultanée (conjointe) d'un plan de contrôle de conformité et celui de suivi de fabrication dans le cadre d'une conception intégrée pour la maîtrise des variations. Comme une étape essentielle du processus de conception, un positionnement de la planification d'inspection a été proposé. Cela nous a permis de figer des données d'entrée pour l'élaboration d'un plan d'inspection. Deux terrains de recherche ont été privilégiés :

- La planification conjointe des tâches de suivi de fabrication et de contrôle de conformité, établissant des liens entre les spécifications du produit et les paramètres du processus de fabrication.
- La restriction d'inspection aux propriétés du produit, de la pièce, du processus de fabrication, et des ressources qui impactent de manière importante, la qualité et le coût final, la fonctionnalité, la perception ou la sûreté du produit.

Par cette co-conception, nous espérons pouvoir réduire les inspections à celles « juste nécessaires ». Pour cela trois grandes lignes et étapes marquantes de ce travail de recherche ont été traduites en trois questions : Quoi contrôler ? Comment contrôler ? Quand contrôler ? Nous considérons la première comme la plus décisive des trois due au choix des caractéristiques qui font l'objet de l'inspection.

Les travaux sont suivis au chapitre 2 par l'argumentation des exigences relatives à la planification d'inspection dont la nécessité d'avoir une analyse multi-niveaux et multicritères, et ce quelle que soit la démarche. Ces exigences sont traduites en critères d'analyse de l'état de l'art sur des approches, méthodes, et outils qui pourraient répondre aux trois questions prédéterminées. Au regard de ces critères d'analyse, les méthodes et outils usuellement utilisés ont été expérimentés sur un exemple commun pour un

meilleur jugement de leur aptitude. Ils ont fait ensuite l'objet de critiques. Quelques extraits de leurs structures sont brièvement présentés dans ce chapitre-là. Ce qui a été mis en avant par cet état de l'art est notamment le fait qu'étant donnée la multitude des données d'entrée nécessaires pour la planification d'inspection, et les multiples dimensions de la performance, un cadre méthodologique doit être défini qui permet la capitalisation des données et la structuration d'une prise de décision multicritères.

Le chapitre 3 suggère la modélisation de cette démarche de prise de décision représentée à travers un diagramme de SADT. Elle est constituée des activités stratégiques et opérationnelles ayant pour but de répondre aux objectifs stratégiques et opérationnels décrits en chapitre 1. L'activité stratégique par l'élaboration des critères et leurs pondérations, et les activités opérationnelles par la génération d'un plan d'inspection en passant par l'évaluation de ces critères. Le découpage de la démarche en activités facilite la validation de la définition des données. Ce cadre méthodologique doit être aussi supporté par les outils et méthodes revus en chapitre 2, pour l'évaluation des critères. Ce découpage en activités a permis aussi un meilleur choix des supports d'activité, c'est-à-dire les outils. Une synthèse à la fin du chapitre 3, croise les données jugées nécessaires pour le processus décisionnel avec les étapes de déploiement des outils pour trouver les outils qui s'ajustent à chacune des activités de la prise de décision, et répond à deux questions :

- Est-ce que chaque élément d'entrée, contrôle et critère définis pour la prise de décision à travers le modèle IDEF0 proposé, sont pris en compte grâce à des outils déjà existants ?
- Est-ce que chaque étape et objectif, traité par les outils, apparaît intégralement ou qu'en partie dans (est couvert par) la démarche décisionnelle ?

Les observations faites, ont orienté le choix des outils, méthodes, ou modèles d'évaluation des critères. Ce qui a émergé de cette synthèse est la complémentarité et l'adaptabilité des outils AMDEC, et KC Flowdown, et du modèle d'estimation de coût (de la qualité) ABC au processus décisionnel.

Cependant ils nécessitent certaines modifications abordées en chapitre 4. Une synthèse approfondie de ceux-ci a permis d'identifier des points d'amélioration pour les rendre parfaitement compatibles avec le processus décisionnel. En ce qui concerne la première activité A01, le cœur de notre démarche, ce travail repose sur l'exploitation des informations communes et complémentaires des outils pour un couplage. Cela a été naturellement suivi par la proposition d'un nouvel outil, baptisé ACDE, à travers lequel la cohérence et l'homogénéité des estimations subjectives dans AMDEC aux multiples niveaux sont assurées via les relations quantitative ou qualitative des KCs. Un diagramme d'activité détaille le déploiement de ce nouvel outil et montre les relations entre différents niveaux d'AMDEC. Quant à la deuxième activité A02, un modèle d'évaluation des critères est proposé, issu du modèle ABC pour l'estimation du coût de la qualité. Il est généralement difficile de définir un indicateur de qualité. Nous sommes en quelque sorte obligés d'amener la qualité sur d'autres types de critères comme le coût, ou bien de traduire le temps en termes de coût (coût de l'unité du temps). L'outil et le modèle proposés ont la particularité d'avoir les mêmes finalités que les activités de la démarche

décisionnelle pour répondre au mieux aux besoins. L'application du nouvel outil de l'activité A01, et du nouveau modèle d'estimation de coût de la qualité de l'activité A02 sur des cas d'études a été ensuite proposée. Certaines pistes de réflexion ont été enfin présentées sur le développement d'une méthode de prise de décision multicritères pour l'activité A03. Le cadre méthodologique proposé pour la génération d'un plan d'inspection doit être complété notamment en vue d'apporter une solution robuste.

Le premier constat tiré de ce travail, concerne le manque de travaux de recherche axés sur l'inspection dans le cadre de l'ingénierie simultanée. Ce qui contraignait la recherche bibliographique mais qui offrait à la fois un large choix d'approches, de méthodes, et d'outils.

La deuxième remarque porte sur l'outil proposé pour intégrer la première activité, ainsi que le modèle d'estimation de coût de la qualité pour la deuxième activité. Ils peuvent devenir lourds à gérer et présenter une difficulté d'application, selon la complexité du système. Le premier par la multitude des caractéristiques et leurs interdépendances, et le deuxième par la difficulté de recueil des données pas toujours disponibles.

Troisièmement comme ce bilan le révèle, notre proposition s'appuie particulièrement sur l'identification des KCs en activité A01, et en partie sur l'identification des modes appropriés d'inspection en activité A02. Ainsi la contribution majeure de ce travail réside dans la mise en place d'une démarche d'identification des caractéristiques clés et la proposition d'un nouvel outil dans ce but.

Cependant nous remarquons par ce bilan que la proposition reste limitée au premier scenario des trois scénarios de l'intégration en conception, décrites au premier chapitre : la conception conjointe du processus de fabrication et du processus d'inspection, et la conception conjointe du triptyque produit-processus-inspection. Grâce à une capitalisation des connaissances des experts, ce « recule » vers les étapes en amont de la conception, pourrait même faciliter et accréditer l'identification des KCs. Les experts sont en mesure de donner des indications en ce qui concerne les spécifications susceptibles d'être non-respectées, ou les processus susceptibles de dériver fréquemment. Cela apporte une autre dimension à notre proposition, par des données d'entrée plus restreintes, et des attentes plus étendues, pour une conception cohérente du produit, du processus, et de l'inspection.

Perspectives

Les perspectives principales sont déclinées comme suit, selon leurs rôles et les limites tirées du bilan qui doivent être dégagées :

a. Poursuite de la démarche proposée sur l'activité A03
b. Extension de la démarche vers des solutions plus robustes
c. Automatisation (interface logicielle)
d. Validation
e. Retour sur des étapes de la conception en amont

La première perspective (a) est bien évidement l'accomplissement de la troisième activité A03 de la démarche. Celle-ci a déjà été initiée dans le cadre d'une thèse de doctorat au sein du laboratoire LCFC et s'appuie sur des données d'une simulation, qui a été commencée lors de ce travail de recherche présentée au chapitre 4. L'objectif est de développer de multiples scénarios de plan d'inspections auxquels sont attachés de multiples critères et leurs niveaux de satisfaction. Puisque ces critères sont souvent de natures différents (qualitatif, quantitatif, …), ou même contradictoires, il est difficile de porter un jugement sur l'efficacité des solutions établies par la simulation.

Cela soulève une autre problématique qui est la proposition d'une méthode de prise de décision pour l'agrégation des critères attachés à chaque solution. Ce qui est attendu par la suite est un classement robuste des alternatives de solution, ou bien une note d'adéquation issue de l'agrégation des critères. Cette note peut être l'indicateur de l'efficacité d'un alternatif qui assure amélioration conjointe des critères pour un système, performant dans son ensemble. La première idée est de procéder par des méthodes type AHP (Analytic Hierarchy Process) (Saaty 1980) qui est simple d'utilisation et prend en compte à la fois des critères quantitatifs et qualitatifs. Elle réduit également le manque d'objectivité dans l'évaluation de l'importance relative (pondération) des critères. Néanmoins elle présente des inconvénients tels que le nombre des comparaisons par paires qui augmente significativement avec l'augmentation du nombre d'alternatives ou critères. Pour la proposition d'une méthode de prise de décision adaptée à notre contexte, un travail a été également commencé dans le cadre d'un projet en collaboration avec l'université de Téhéran.

En parallèle avec la première perspective, la deuxième perspective (b) peut être initiée. Une étude de sensibilité des solutions aux variations du niveau des critères peut être menée. Cette étude de sensibilité peut se limiter à la première activité de la démarche A01 pour l'identification des KCs. Dans ce cas l'étude porte sur l'effet des estimations des facteurs de risque sur les caractéristiques clés identifiées. En effet ce qui offre cette possibilité est la logique de KC Flowdown en support des tableaux d'ACDE.

La deuxième piste dans le but d'étendre la validité des solutions (b) est la prise en compte des incertitudes des estimations par la logique flou, notamment lors de la première activité où elles sont les plus subjectives en ce qui concerne l'évaluation des poids d'importance, des gravités, des causalités, …. Certains travaux ont été effectués au sein du laboratoire LCFC pour améliorer la prise de décision par l'outil proposé. Ils ont employé la logique floue pour atténuer l'effet des subjectivités des estimations. La logique flou est la méthode qui est le plus souvent intégrée en AMDEC classique pour la prise en compte des incertitudes ou d'une manière générale lorsque nous ne possédons pas des informations suffisamment précises pour mener une étude probabiliste (ou que nous n'en avons pas besoin à un certain stade de la prise de décision). En ce qui concerne l'outil proposé la logique floue a été utilisée pour une meilleure définition des règles de propagation des estimations fournies en une et unique fois par l'expert sur deux facteurs de décision : la gravité, et la difficulté de réalisation (Figure 70). Cela assure un choix robuste des caractéristiques clés.

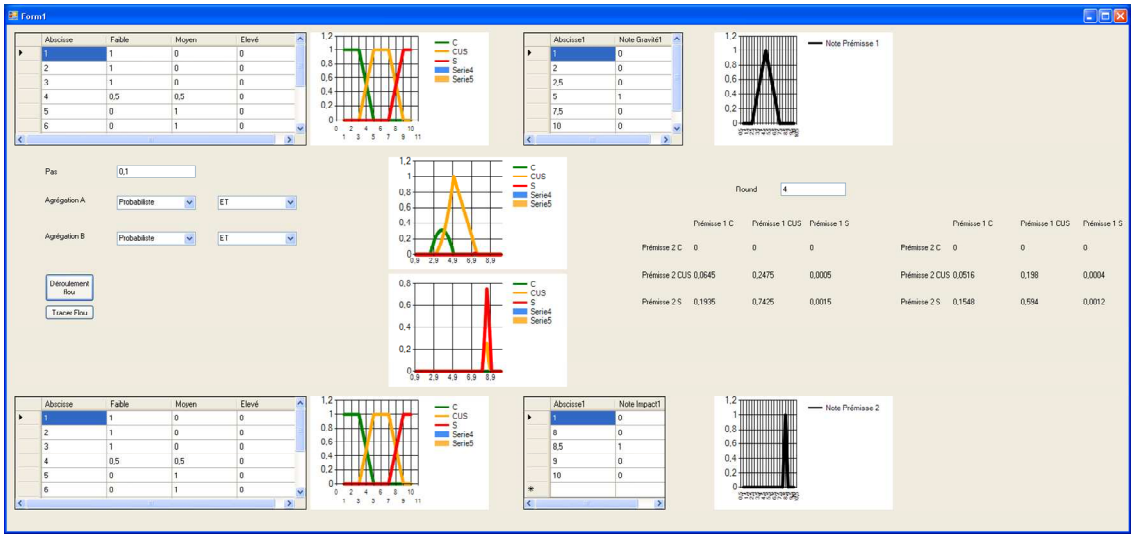


Figure 70. Propagation des facteurs de risque incertains

Une fois ces limites levées, nous pouvons également envisager l'automatisation de la génération de plans d'inspection (c) par la démarche proposée. L'automatisation concerne dans un premier temps le stockage, l'utilisation, le suivi, et le traitement automatique des données dans le cadre d'ACDE. D'autant plus que le déploiement des outils peut devenir très complexe avec l'augmentation du nombre des caractéristiques qu'ils traitent. Les applications de l'outil proposé en chapitre 4 sont uniquement pour des objectifs de démonstration. Elles n'ont pas été réalisées dans un environnement logiciel permettant de construire l'ACDE automatiquement. Dans un deuxième temps, elle concerne la procédure d'identification des KCs via l'exploitation des données structurées par l'outil. Et enfin l'automatisation peut s'étendre à l'agrégation des critères (via AHP ou …) pour un classement des alternatives de solution.

Pour une validation plus poussée, l'idéal serait finalement d'appliquer la démarche sur d'autres cas industriels.

Une remarque peut compléter ces perspectives. Cette co-conception a été délimitée aux activités de contrôle de conformité et de suivi de fabrication comme une des dernières étapes du processus de conception. Or l'identification des différents éléments nécessaires à cela, et des liens produit-processus-inspection nous permet d'envisager d'étendre cette intégration à une grande plage dans le processus de conception, jusqu'à l'étape de la conception du produit, pour une conception plus rapide et plus efficace.

Références bibliographiques

Abugov, R., 1993. From trend charts to control charts: setup tests for making the leap. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 6(2), pp.184–188.

Akao, Y., 1997. QFD: Past, Present, and Future. In *International Symposium on QFD*.

Arnheiter, E.D. & Maleyeff, J., 2005. The integration of lean management and Six Sigma. *The TQM Magazine*, 17(1), pp.5–18.

Arnzen, H.E., 1967. Failure mode and effects analysis: A powerful engineering tool for component and system optimisation. In *Proceedings of 5th Reliability and Maintainability Conference*. New York.

Baqai, A., 2010. *Co-conception des processus d'usinage et des configurations cinématiques d'un système de production reconfigurable*. Thèse de doctorat à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Metz.

Bassetto, S., 2005. *Contribution à la qualification et amélioration des moyens de production. Application à une usine de recherche et production de semi-conducteurs*. Thèse de doctorat à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Metz.

Bassetto, S., Siadat, A. & Tollenaere, M., 2011. The management of process control deployment using interactions in risks analyses. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24(4), pp.458–465.

Ben-Daya, M. & Raouf, A., 1996. A revised failure mode and effects analysis model. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 13(1), pp.43–47.

Bertolini, M., Bevilacqua, M. & Massini, R., 2006. FMECA approach to product traceability in the food industry. *Food Control*, 17(2), pp.137–145.

Bescos, P.-L., 1995. *Contrôle de gestion et management*, Montchrestien.

Bisgaard, S., Hunter, W.G. & Pallesen, L., 1984. Economic Selection of Quality Manufactured Product. *Technometrics*, 26(1), pp.9–18.

Boeing Company et al., 1992. *Key Characteristics: The First Step to Advanced Quality* The Compan.,

Bowles, J.B. & Peláez, C.E., 1995. Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 50(2), pp.203–213.

Bradley, M., 1994. Starting Total Quality Management from ISO 9000. *The TQM Magazine*, 6(1), pp.50–54.

Braglia, M. & Bevilacqua, M., 2000. Fuzzy modelling and analytical hierarchy processing as a means of quantifying risk levels associated with failure modes in production systems. *Technology, Law and Insurance*, 5(3-4), pp.125–134.

Braglia, M., Frosolini, M. & Montanari, R., 2003. Fuzzy TOPSIS approach for failure mode, effects and criticality analysis. *Quality and Reliability Engineering International*, 19(5), pp.425–443.

Bunney, H.S. & Dale, B.G., 1997. The implementation of quality management tools and techniques: a study. *The TQM Magazine*, 9(3), pp.183–189.

Carlsson, O., 1989. Economic selection of a process level under acceptance sampling by variables. *Engineering Costs and Production Economics*, 16(1), pp.69–78.

Carmignani, G., 2009. An integrated structural framework to cost-based FMECA: The priority-cost FMECA. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(4), pp.861–871.

Certa, 2014. CERTA. Available at: http://www.certaproductique.fr/index_fichiers/telechargement.htm [Accessed April 26, 2014].

Chang, C.-L., Liu, P.-H. & Wei, C.-C., 2001. Failure mode and effects analysis using grey theory. *Integrated Manufacturing Systems*, 12(3), pp.211–216.

Chang, C.-L., Wei, C.-C. & Lee, Y.-H., 1999. Failure mode and effects analysis using fuzzy method and grey theory. *Kybernetes*, 28(9), pp.1072–1080.

Chang, K.-H., Cheng, C.-H. & Chang, Y.-C., 2009. Reprioritization of failures in a silane supply system using an intuitionistic fuzzy set ranking technique. *Soft Computing*, 14(3), pp.285–298.

Charpentier, F. & Mathieu, L., 2005. L'analyse fonctionnelle technique , une solution pour la recherche des conditions fonctionnelles géométriques. In *Actes de la journée thématique AIP-Primeca Tolérancement le long du cycle de vie du produit*. Cachan, France.

Chase, K.W. et al., 1990. Least Cost Tolerance Allocation for Mechanical Assemblies with Automated Process Selection. *Manufacturing Review*, 3(1), pp.49–59.

Chen, T.J., 1999. Quantitative selection of inspection plans for variation risk management.

Chin, K.S. et al., 2009. Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach. *Computers & Operations Research*, 36(6), pp.1768–1779.

Chin, K.S., Zheng, L.Y. & Wei, L., 2003. A hybrid rough-cut process planning for quality. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22(9-10), pp.733–743.

China, M., 1997. Incidence de la réduction d'effectifs sur la perte de savoir-faire de l'entreprise. In Hermès - Lavoisier, ed. *Connaissance et savoir-faire en entreprise:intégration et capitalisation, coordination Fouet J. M.* Paris, pp. 119–126.

Cochran, D. & Rudolf, H., 2003. Investment and resource allocation Methodology to support manufacturing system Design Implementation. *Journal of Manufacturing Systems CIRP*.

Collège Français de Métrologie, C., 2009. *Surveillance des processus de mesure - Ou comment garantir au quotidien la performance des processus de mesure?*,

Collins, R.D., Case, K. & Kemble Bennett, G., 1973. The effects of inspection error on single sampling inspection plans. *International Journal of Production Research*, 11(3), pp.289–298.

Dantan, J.-Y., 2009. *Contribution à l'optimisation de la robustesse des produits par la maîtrise des variations géométriques en phase de conception, Thèse d'habilitation à diriger des recherches*. Thèse d'habilitation à diriger des recherches à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan.

Deeb, S., 2008. *Contribution méthodologique à la maîtrise conjointe de la qualité d'un produit et de ses processus de production par une modélisation des concepts qualité*. Thèse de doctorat à l'Université Henri Poincaré, Nancy I.

Delvosalle, C., 2002. La qualité:des concepts à la pratique. *Pyramides*, (5), pp.137–154.

Deming, W.E., 2000. *Out of the Crisis*, MIT Press.

Demoly, F., 2010. *Conception intégrée et gestion d'informations techniques:application à l'ingénierie du produit et de sa séquence d'assemblage*. Thèse de doctorat à l'Université de Technologie de Belfort Montbéliard.

Deng, J.L., 1989. Introduction to Grey system theory. *The Journal of Grey System*, 1(1), pp.1–24.

Dhillon, B.S., 1999. *Design Reliability: Fundamentals and Applications*, CRC Press.

DIN/ISO 14253-1, 2013. Spécification géométrique des produits (GPS) - Vérification par la mesure des pièces et des équipements de mesure - Partie 1:règles de décision pour prouver la conformité ou la non-conformité à la spécification.

Dodge, H.F. & Romig, H.G., 1945. *Sampling Inspection Tables: Single and Double Sampling* Wiley, ed., New York.

Duret, D. & Pillet, M., 2011. *Qualité en production: de l'ISO 9000 à Six Sigma* Eyrolles.,

Elmaghraby, S.E., 1986. Comments on a DP Model for The Optimal Inspection Strategy. *IIE Transactions*, 18(1), pp.104–108.

Etienne, A., 2007. *Intégration Produit / Process par les concepts d'activités et de caractéristiques clés - Application à l'optimisation de l'allocation des tolérances géométriques.* Thèse de doctorat à l'Université Paul Verlaine - Metz.

Etienne, A. et al., 2008. Variation management by functional tolerance allocation and manufacturing process selection. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2(4), pp.207–218.

Evans, J.R. & Lindsay, W.M., 1999. *The management and control of quality*, Cincinnati, Ohio: South-Western College Pub.

Everhart, J.L., 1960. *Handbook of parts, forms, processes and materials in design engineering*, New York: Van-Nostrand-Reinhold.

Faisandier, A., 2011. Ingénierie des besoins et des exigences. In *Ingénierie des systèmes complexes (document pédagogique)*. MAP Systèmes.

Fanmuy, G. & Groupe de travail Ingénierie des exigences, 2011. *Bonnes pratiques en ingénierie des exigences*, Cépaduès.

Feigenbaum, A.V., 1986. *Total Quality Control* 3ème Editi., McGraw Hill Company.

Feigenwald, V., 2012. *Controlling non-conformity propagation in low volume manufacturing*. Thèse de doctorat à l'Université de Grenoble.

Feigenwald, V., Bassetto, S. & Tollenaere, M., 2011. Vers la maitrise de la propagation des non-conformités en fabrication. Cas d'étude dans une usine d'assemblage électromécanique. In *11ème Conférence Internationale de Génie Industriel*.

Feng, C.-X. (Jack), Kusiak, A. & Huang, C.-C., 1996. Cost evaluation in design with form features. *Computer-Aided Design*, 28(11), pp.879–885.

Feng, S. & Zhang, Y., 1999. Conceptual Process Planning-A definition and functional decomposition. *Manufacturing Science and Engineering*, 10, pp.97–106.

Fiorèse, S. & Meinadier, J.-P., 2012. *Découvrir et comprendre l'ingénierie système* Cépaduès., Toulouse: Association française d'ingénierie Système.

Franceschini, F. & Galetto, M., 2001. A new approach for evaluation of risk priorities of failure modes in FMEA. *International Journal of Production Research*, 39(13), pp.2991–3002.

Gilchrist, W., 1993. Modeling failure mode and effect analysis. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 10(5), pp.16–23.

Godot, X., 2013. *Interactions projet/données lors de la conception de produits multitechnologiques en contexte collaboratif*. Thèse de doctorat à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Metz.

Gotzamani, K.D. & Tsiotras, G.D., 2002. The true motives behind ISO 9000 certification: Their effect on the overall certification benefits and long term contribution towards TQM. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 19(2), pp.151–169.

Greenshtein, E. & Rabinowitz, G., 1997. Double-stage inspection for screening multi-characteristic items. *IIE Transactions*, 29(12), pp.1057–1061.

Gregory, M.J., 1993. Integrated performance measurement: A review of current practice and emerging trends. *International Journal of Production Economics*, 30-31, pp.281–296.

El Gueder, J., 2012. *Modèle et logiciel KBE pour l'intégration du chainage des opérations de fabrication en conception de produit*. Thèse de doctorat à l'Université de Téchnologie de Troyes.

GUM, 2008. Évaluation des données de mesure — Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure.

Hassan, A., 2010. *Proposition et développement d'une approche pour la maîtrise conjointe qualité/coût lors de la conception et de l'industrialisation du produit*. Thèse de doctorat à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Metz.

Hellsten, U. & Klefsjö, B., 2000. TQM as a management system consisting of values, techniques and tools. *The TQM Magazine*, 12(4), pp.238–244.

Hong, Y.S. & Chang, T.C., 2002. A comprehensive review of tolerancing research. *International Journal of Production Research*, 40(11), pp.2425–2459.

Hossain, A., Choudhury, Z.A. & Suyut, S., 1996. Statistical process control of an industrial process in real time. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 32(2), pp.243–249.

Huarng, F., Horng, C. & Chen, C., 1999. A study of ISO 9000 process, motivation and performance. *Total Quality Management*, 10(7), pp.1009–1025.

Hunter, W.G. & Kartha, C.P., 1977. Determining the Most Profitable Target Value for a Production Process. *Journal of Quality Technology*, 9(4), pp.176–181.

Imai, M., 1986. *Kaizen (Ky'zen), the key to Japan's competitive success*,

ISO 8402, 1994. Quality management and quality assurance --Vocabulary.

ISO 9001, 2008. Systèmes de management de la qualité -- Exigences.

ISO/DIN, 2012. Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM), 3th Edition.

Johnson, H.T., 1991. *Relevance Lost: The Rise and Fall of Management Accounting*,

Kleijnen, J.P.C. et al., 1992. Sampling for quality inspection and correction: AOQL performance criteria. *European Journal of Operational Research*, 62(3), pp.372–379.

Krumwiede, D. & Sheu, C., 1996. Implementing SPC in a small organization: a TQM approach. *Integrated Manufacturing Systems*, 7(1), pp.45–51.

Kunzmann, H. et al., 2005. Productive Metrology - Adding Value to Manufacture. In *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. pp. 54(2), 691–713.

Labrousse, M., 2004. *Proposition d'un modèle conceptuel unifié pour la gestion dynamique des connaissances d'entreprise*. Thèse de doctorat en Génie Mécanique de l'Ecole Centrale de Nantes et de l'Université de Nantes.

Lall, V., Stylianides, C. & Stanislao, J., 1991. Integrating economics into quality control charts. *Computers & Industrial Engineering*, 21(1), pp.135–139.

LeDain, M.-A. & Ndao, P.I., 1997. Sur un système d'indicateurs de performance pour l'évaluation d'une automatisation dans une entreprise papetière. In *Deuxième Congrès International Franco-québécois de Génie Industriel*. Albi.

Liu, H.-C. et al., 2012. Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended VIKOR method under fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, 39(17), pp.12926–12934.

Liu, H.-C., Liu, L. & Liu, N., 2013. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications*, 40(2), pp.828–838.

Liu, Z., Xiao, J. & Huang, Y., 2009. Proactive product quality control: An integrated product and process control approach to MIMO systems. *Chemical Engineering Journal*, 149(1), pp.435–446.

Lööf, J., Hermansson, T. & Söderberg, R., 2007. An Efficient Solution to the Discrete Least-Cost Tolerance Allocation Problem with General Loss Functions J. K. Davidson, ed. *Models for Computer Aided Tolerancing in Design and Manufacturing*, pp.115–124.

Lubicz, M., 1983. On the problem of optimization of a quality inspection process structure. *International Journal of Production Research*, 21(3), pp.369–381.

Marcotte, F., 1995. *Contribution à la modélisation des systèmes de production:extension du modèle GRAI*. Bordeaux 1.

Marguet, B. & Mathieu, L., 2001. Integrated Design Method to Improve Producibility based on Product Key Characteristics and Assembly Sequences. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 50(1), pp.85–88.

Mathieu, L., 2007. *Contribution à la maîtrise des variations géométriques des produits le long de leur cycle de vie*. Thèse d'habilitation à diriger des recherches à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan.

Matousek, R., 1957. *Engineering Design: A Systematic Approach*, London, UK: Lackie & Son Ltd.

Mei, W.-H., Case, K. & Schmidt, J.W., 1975. Bias and imprecision in variables acceptance sampling Effects and compensation. *International Journal of Production Research*, 13(4), pp.327–340.

Menzefricke, E., 1984. The effects of variability in inspection error. *Journal of Quality Technology*, 16, pp.131–135.

Mili, A. et al., 2009. Dynamic risk management unveil productivity improvements. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(1), pp.25–34.

Mili, A., 2009. *Vers des méthodes fiables de contrôle des procédés par la maîtrise du risque Contribution à la fiabilisation des méthodes de process control d'une unité de Recherche et de Production de circuits semi-conducteurs*. Thèse de doctorat à l'Institut Polytechnique de Grenoble.

Mil-Std-1629, 1980. Military Standard, Procedure for Performing A Failure Mode Effects and Criticality Analysis.

Mirdamadi, S. et al., 2013. Cost Estimation Method for Variation Management. In *Procedia CIRP*. pp. 44–53.

Mizuno, S. & Akao, Y., 1978. Quality function deployment: a company wide quality approach. In *Union of Japanese Scientists and Engineers Press*. Tokyo.

Mojtahedi, S.M.H., Mousavi, S.M. & Makui, A., 2010. Project risk identification and assessment simultaneously using multi-attribute group decision making technique. *Safety Science*, 48(4), pp.499–507.

Montgomery, D.C., 1991. *Introduction to statistical quality control*, New York: Wiley.

Moroni, G., Petrò, S. & Tolio, T., 2011. Early cost estimation for tolerance verification. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(1), pp.195–198.

Mousavi, S.M. et al., 2012. A multi-stage decision-making process for multiple attributes analysis under an interval-valued fuzzy environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(9-12), pp.1263–1273.

Mousavi, S.M. et al., 2014. A new intuitionistic fuzzy grey model for selection problems with an application to the inspection planning in manufacturing firms. *Soumis à Engineering Applications of Artificial Intelligence*.

Noël, F. & Roucoules, L., 2008. The PPO design model with respect to digital enterprise technologies among product life cycle. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 21(2), pp.139–145.

Ozouf, V., 2009. *Concevoir et produire "sûr de fonctionnement":comment conserver un niveau de risques acceptable dans un contexte de conception/industrialisation de plus en plus rapide d'un produit de plus en plus complexe*. Thèse de doctorat à l'Université de Savoie.

Park, T. & Kim, K.-J., 1998. Determination of an optimal set of design requirements using house of quality. *Journal of Operations Management*, 16(5), pp.569–581.

Le Pavic, F., Laroche, F. & Kerouanton, J.-L., 2013. *Vers une extension de la modélisation d'entreprise pour la rétro-conception de sites industriels disparus:cas d'étude de l'Arsenal de la Marine de Lorient*,

Perilhon, P., 2004. *Approche, démarche, méthodologie, méthodes, outils:comment s'y retrouver?*, Rochelle.

Peters, J., 1977. Metrology in design and manufacturing: facts and trends. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*.

Pfeifer, T., 2002. *Production Metrology*,

Pillay, A. & Wang, J., 2003. Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. *Reliability Engineering & System Safety*, 79(1), pp.69–85.

Pillet, M., 2005. *Appliquer la maîtrise statistique des procédés MSP/SPC* 4ème éditi. E. D'Organisation, ed.,

Pillet, M., 1993. *Contribution à la maîtrise statistique des procédés:cas particulier des petites séries*. Thèse de doctorat à l'Université de Savoie.

Pillet, M. et al., 2007. La matrice d'impact pour construire un plan de surveillance avec les contraintes de l'ingénierie simultanée. In *5th International Seminar Integrated Design and Production*.

PMBOK, A., 2000. Guide to the project Management body of knowledge.

Porter, M.E., 1982. *Choix stratégiques et concurrence: techniques d'analyse des secteurs et de la concurrence dans l'industrie*, Economica, ISBN 2717805168.

Qureshi, A.J., 2011. *Contribution à la maîtrise de la robustesse des produits: Formalisation par logique formelle, applications à la conception ensembliste et au tolérancement*. Thèse de doctorat à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Metz.

Roucoules, L., 2007. *Contribution à l'intégration des activités collaboratives et métier en conception de produit. Une approche au juste besoin:des spécifications fonctionnelles du produit aux choix des procédés de fabrication (la maîtrise du produit par la maîtrise des pro*. Thèse d'habilitation à diriger des recherches à l'Université de Technologie de Compiègne.

Roucoules, L. & Skander, A., 2004. Manufacturing Process Selection and Integration in Product Design. In S. Tichkiewitch & D. Brissaud, eds. *Methods and Tools for Co-operative and Integrated Design*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 71–82.

Saaty, T.L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw Hill.

Salah, S., Rahim, A. & Carretero, J.A., 2010. The integration of Six Sigma and lean management. *International Journal of Lean Six Sigma*, 1(3), pp.249–274.

Sallak, M., Aguirre, F. & Schon, W., 2013. Incertitudes aléatoires et épistémiques, comment les distinguer et les manipuler dans les études de fiabilité? In *QUALITA2013*. Compiègne-France.

Sankar, N.R. & Prabhu, B.S., 2001. Modified approach for prioritization of failures in a system failure mode and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 18(3), pp.324–336.

Savio, E., 2012. A methodology for the quantification of value-adding by manufacturing metrology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(1), pp.503–506.

Schippers, W.A.J., 2001. An integrated approach to process control. *International Journal of Production Economics*, 69(1), pp.93–105.

Schmitt, R. & Behrens, C., 2007. A Statistical Method for analyses of Cost- and Risk optimal Tolerance Allocations based on Assured Input Data. In *Proceedings 10h CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing*. Erlangen, Germany.

Seyed-Hosseini, S.M., Safaei, N. & Asgharpour, M.J., 2006. Reprioritization of failures in a system failure mode and effects analysis by decision making trial and evaluation laboratory technique. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(8), pp.872–881.

Shahin, A., Ranjbar, M.J. & Abedi, S., 2011. Critical Discussion on the Relationship between Failure Occurrence and Severity Using Reliability Functions. *Management Science and Engineering*, 5(1), pp.26–36.

Shahzad, M.K., 2012. *Exploitation dynamique des données de production pour améliorer les méthodes DFM dans l'industrie Microélectronique*. Thèse de doctorat à l'Université de Grenoble.

Shamsuddin, A. & Masjuki, H., 2003. Survey and case investigations on application of quality management tools and techniques in SMIs. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 20(7), pp.795–826.

Sharma, R.K., Kumar, D. & Kumar, P., 2008. Fuzzy modeling of system behavior for risk and reliability analysis. *International Journal of Systems Science*, 39(6), pp.563–581.

Sharma, R.K., Kumar, D. & Kumar, P., 2007. Modeling system behavior for risk and reliability analysis using KBARM. *Quality and Reliability Engineering International*, 23(8), pp.973–998.

Sharma, R.K., Kumar, D. & Kumar, P., 2005. Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modelling. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 22(9), pp.986–1004.

Shiau, Y.R., 2003. Inspection Allocation Planning for a Multiple Quality Characteristic Advanced Manufacturing System. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21(7), pp.494–500.

Shih, K.C., Wu, K.W. & Huang, U.P., 1996. *Information of grey relation*, Taiwan.

Shoji, S., Alan, G. & David, W., 1997. *4 révolutions du management par la qualité totale,* Dunod, ISBN 2100030345.

Skander, A., 2006. *Méthode et modèle DFM pour le choix des procédés et l'intégration des contraintes de fabrication vers l'émergence de la solution produit*. Thèse de doctorat à l'Université de Troyes.

Sohlenius, G., 1992. Concurrent engineering. *Annals of CIRP*, 41(2), pp.645–655.

Srinivasan, V., 2001. An integrated view of geometrical product specification and verification. In *Proceedings 7th CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing*. pp. 1–10.

Srinivasan, V., 1999. On interpreting Key Characteristics. In *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences*. Las Vegas, Nevada.

Stamatis, D.H., 2003. *Failure Mode and Effect Analysis: Fmea from Theory to Execution*, ASQ Quality Press, ISBN 0873895983.

Stephens, B., 1997. Implementation of ISO 9000 or Ford's Q1 Award: effects on organizational knowledge and application of TQM principles and quality tools. *The TQM Magazine*, 9(3), pp.190–200.

Sun, H., 2000. Total quality management, ISO 9000 certification and performance improvement. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 17(2), pp.168–179.

Taguchi, G., 1987. *System of experimental design: Engineering methods to optimize quality and minimize costs*, UNIPUB/Kraus International Publications (White Plains, N.Y. and Dearborn, Mich.).

Taguchi, G., 1993. *Taguchi on robust technology development: bringing quality engineering upstream*,

Tang, K. & Schneider, H., 1987. The Effects of Inspection Error on a Complete Inspection Plan. *IIE Transactions*, 19(4), pp.421–428.

Thornton, A.C., 1999. A Mathematical Framework for the Key Characteristic Process. *Research in Engineering Design*, 11(3), pp.145–157.

Thornton, A.C., 2000. Quantitative Selection of Variation Reduction Plans. *Journal of Mechanical Design*, 122(2), p.185.

Thornton, A.C., 2003. *Variation Risk Management: Focusing Quality Improvements in Product Development and Production*, Wiley, ISBN 978-0-471-44679-8.

Tollenaere, M., 1998. *Conception de produits mécaniques: méthodes, modèles et outils*,

Vahdani, B. et al., 2013. A new design of the elimination and choice translating reality method for multi-criteria group decision-making in an intuitionistic fuzzy environment. *Applied Mathematical Modelling*, 37(4), pp.1781–1799.

Varret, A., 2012. *De la conception collaborative à l'ingénierie performante de produits optimisés à base de connaissances métier*. Thèse de doctorat à l'Université de Technologie de Belfort Montbéliard.

Vasseur, D. & Magne, L., 2006. *industriels:complexité, incertitude, décision:une approche interdisciplinaire,* T. & D. Lavoisier, ISBN 2743009365.

Vernadat, F., 1999. *Techniques de modélisation en entreprise: applications aux processus opérationnels*,

Viswanadham, N., Sharma, S.M. & Taneja, M., 1996. Inspection allocation in manufacturing systems using stochastic search techniques. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 26(2), pp.222–230.

Wang, Y.-M. et al., 2009. Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. *Expert Systems with Applications*, 36(2), pp.1195–1207.

Whitney, D.E., 2004. *Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development, Volume 1*, Oxford University Press, ISBN 0195157826.

Wilkinson, A.J. et al., 1998. *Managing with Total Quality Management:Theory and Practice*, London, United Kingdom, Palgrave Macmillan, ISBN 978-0333620076.

Withers, B. & Ebrahimpour, M., 2000. Does ISO 9000 certification affect the dimensions of quality used for competitive advantage? *European Management Journal*, 18(4), pp.431–443.

Wong, F.S.Y., Chuah, K.B. & Venuvinod, P.K., 2006. Automated inspection process planning: Algorithmic inspection feature recognition, and inspection case representation for CBR. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22(1), pp.56–68.

Wu, H.H., Deng, J.L. & Wen, K.L., 1984. *Introduction to grey analysis*, Taiwan.

XP E 04-009, 2003. Spécification géométrique des produits (GPS) – Hiérarchisation des caractéristiques produit-processus.

Yang, J. et al., 2011. Risk evaluation in failure mode and effects analysis of aircraft turbine rotor blades using Dempster–Shafer evidence theory under uncertainty. *Engineering Failure Analysis*, 18(8), pp.2084–2092.

Yang, K. & El-Haik, B., 2003. *Design for six sigma* McGraw-Hil., New York, 978-0071547673.

Yang, Y., 2007. *Integrated quality control planning in Computer Aided Manufacturing Planning*. Thèse de doctorat à Worcester Polytechnic Institute.

Zammori, F. & Gabbrielli, R., 2012. ANP/RPN: a multi criteria evaluation of the Risk Priority Number. *Quality and Reliability Engineering International*, 28(1), pp.85–104.

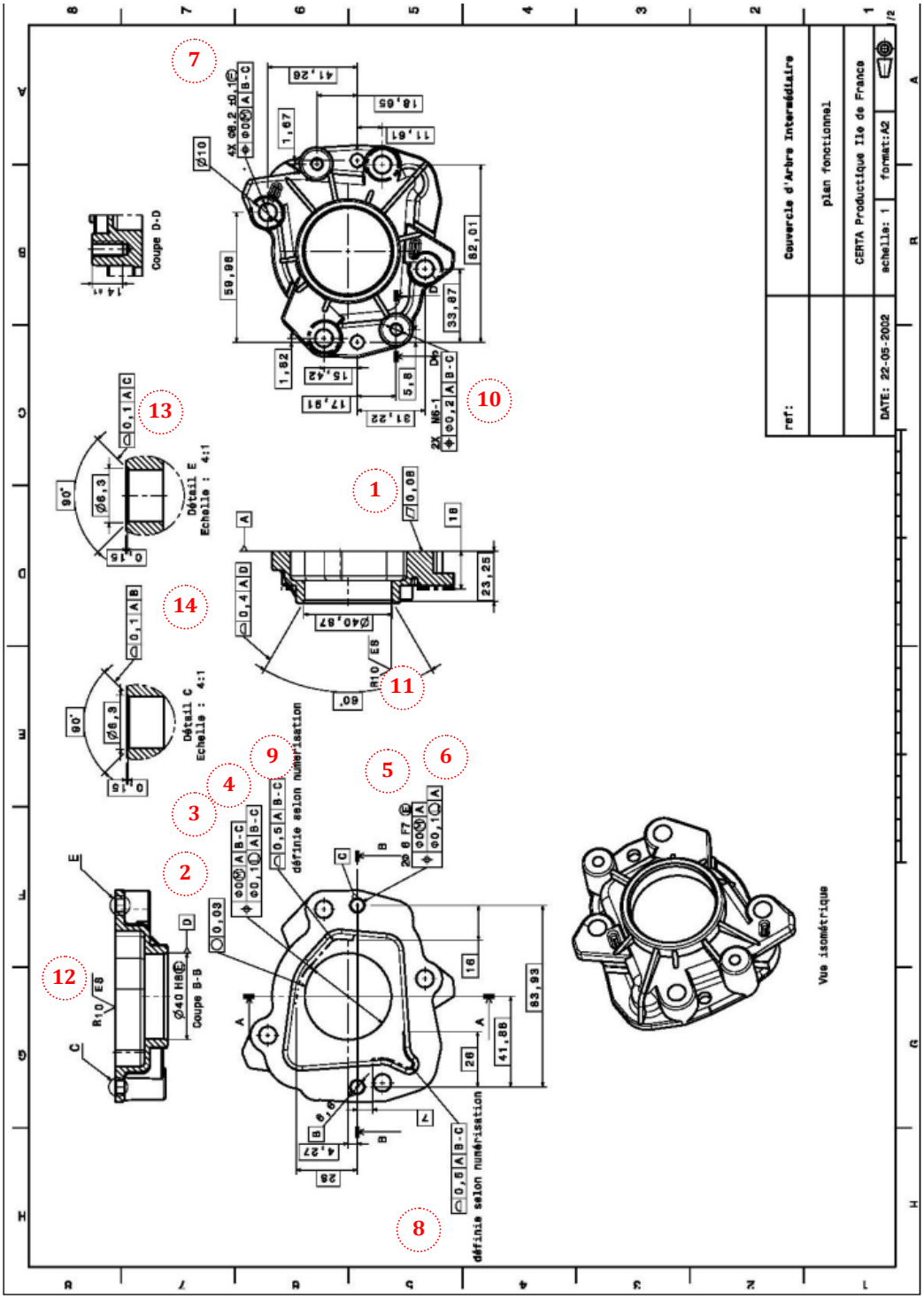
Zhao, F., Xu, X. & Xie, S.Q., 2009. Computer-Aided Inspection Planning—The state of the art. *Computers in Industry*, 60(7), pp.453–466.

Zheng, L.Y. & Chin, K.S., 2004. QFD based optimal process quality planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(7-8), pp.831–841.

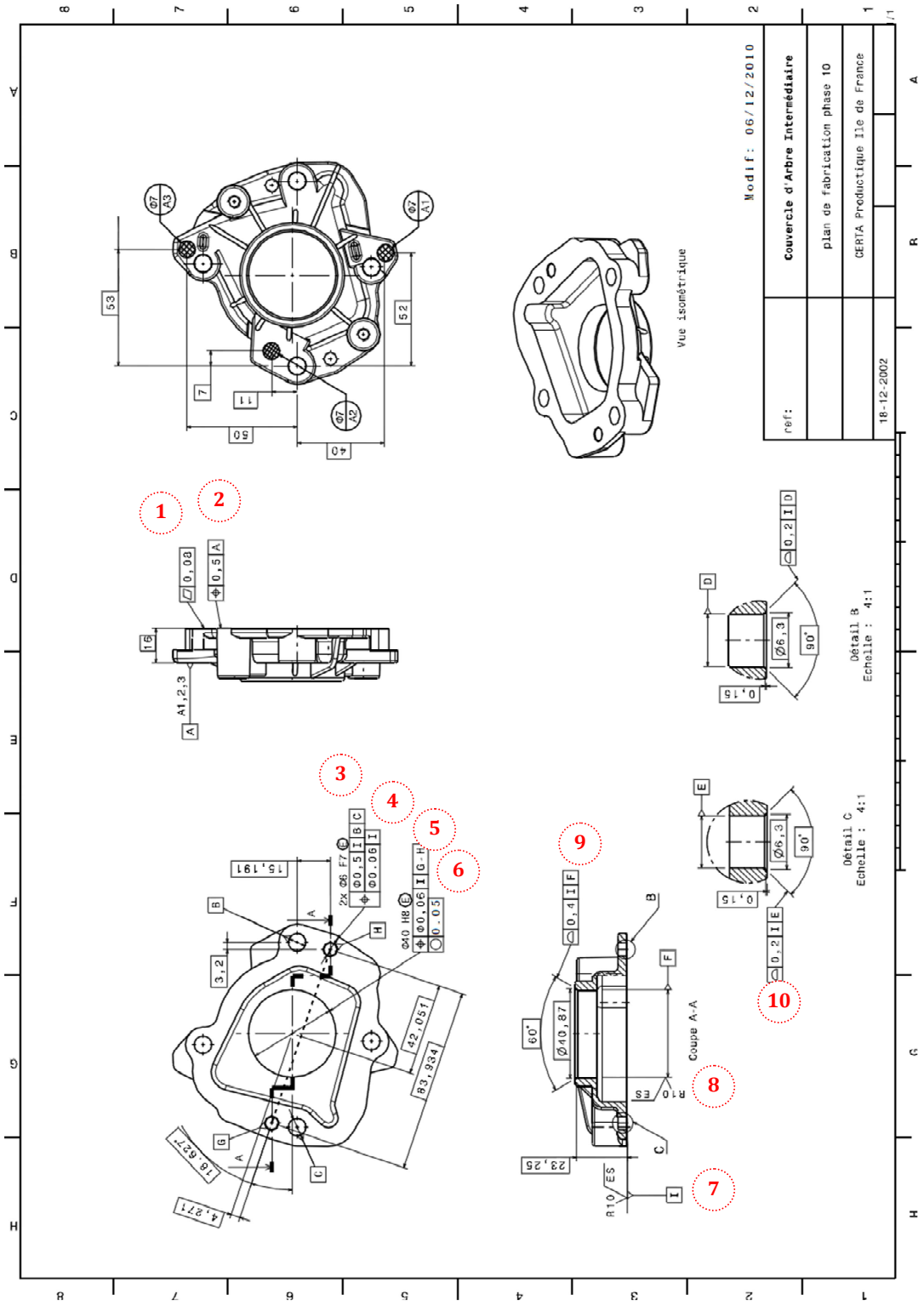
Annexes

Annexe I - Dessins de définition de la pièce CAI

I.1. Plan fonctionnel

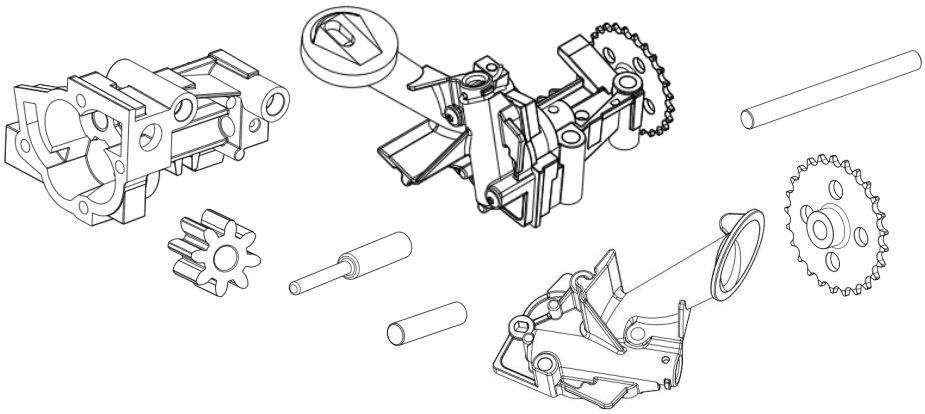


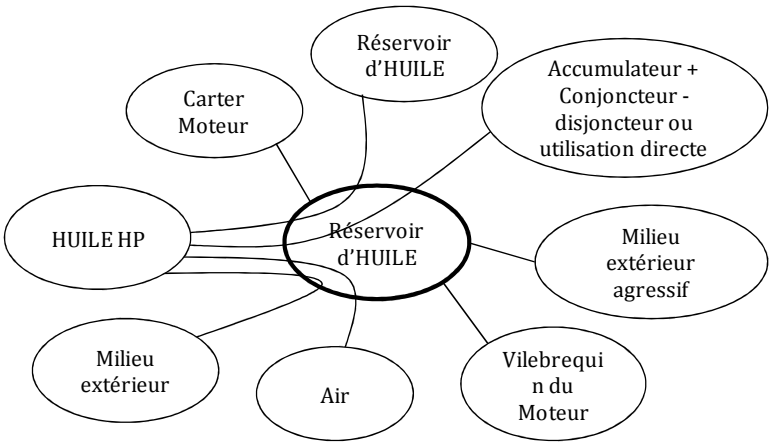
I.2. Plan fabrication



Annexe II – Eléments de l'analyse fonctionnelle de la pompe à engrenages

La mise en situation et l'analyse fonctionnelle de la pompe sont inspirées d'un document pédagogique (Certa 2014).





II.1. Fonctions principales

FP1 : Aspirer l'huile du réservoir et la monter en pression.

FP2 : Echanger les calories entre l'huile et l'air.

FP3 : Accumuler et réguler la pression d'huile HP.

FP4 : Empêcher toutes fuites d'huile vers l'extérieur.

II.2. Fonctions contraintes

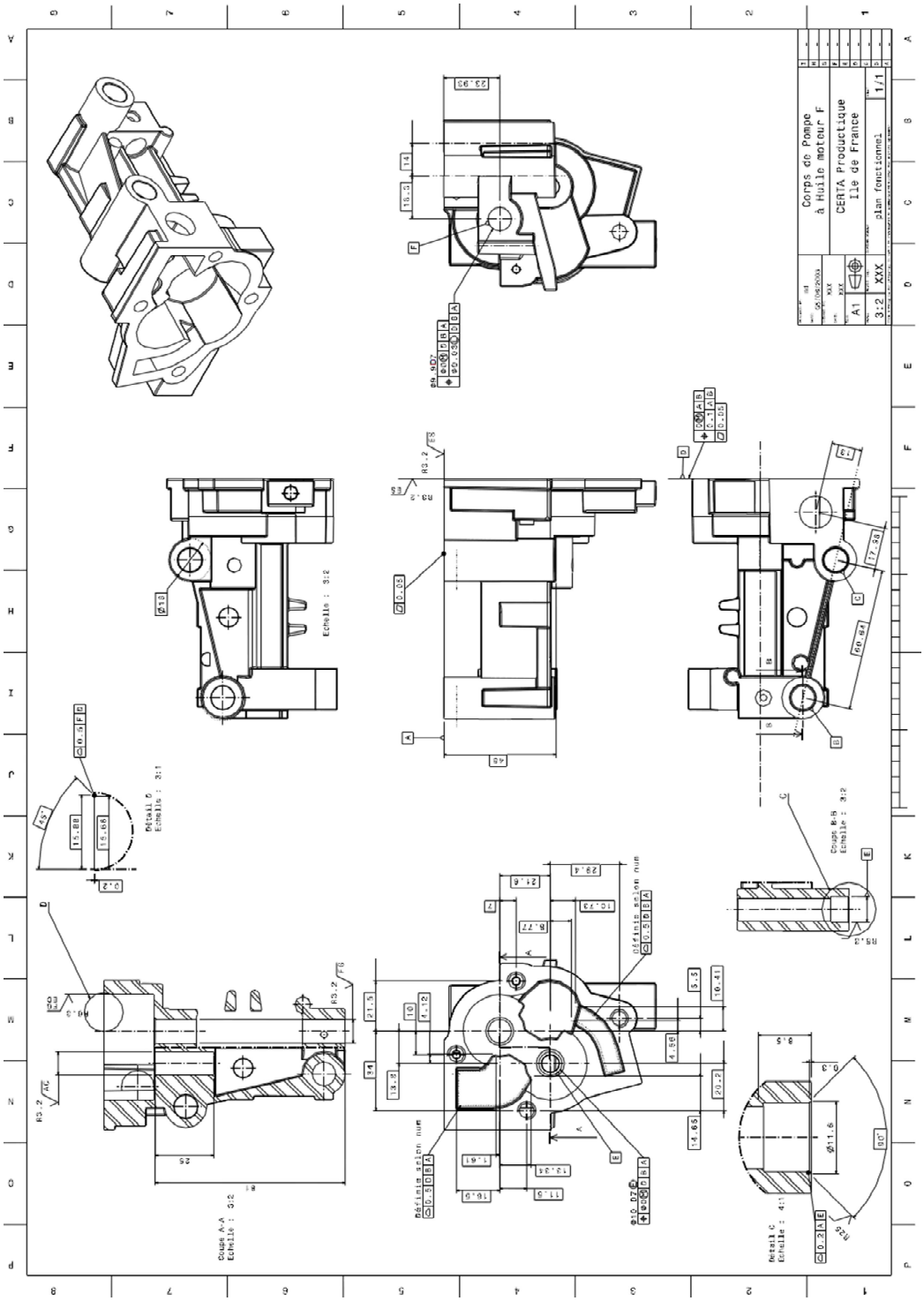
C1 : Fixer et adapter la pompe sur différents moteurs.

C2 : Motoriser la pompe et respecter les limites de rotations.

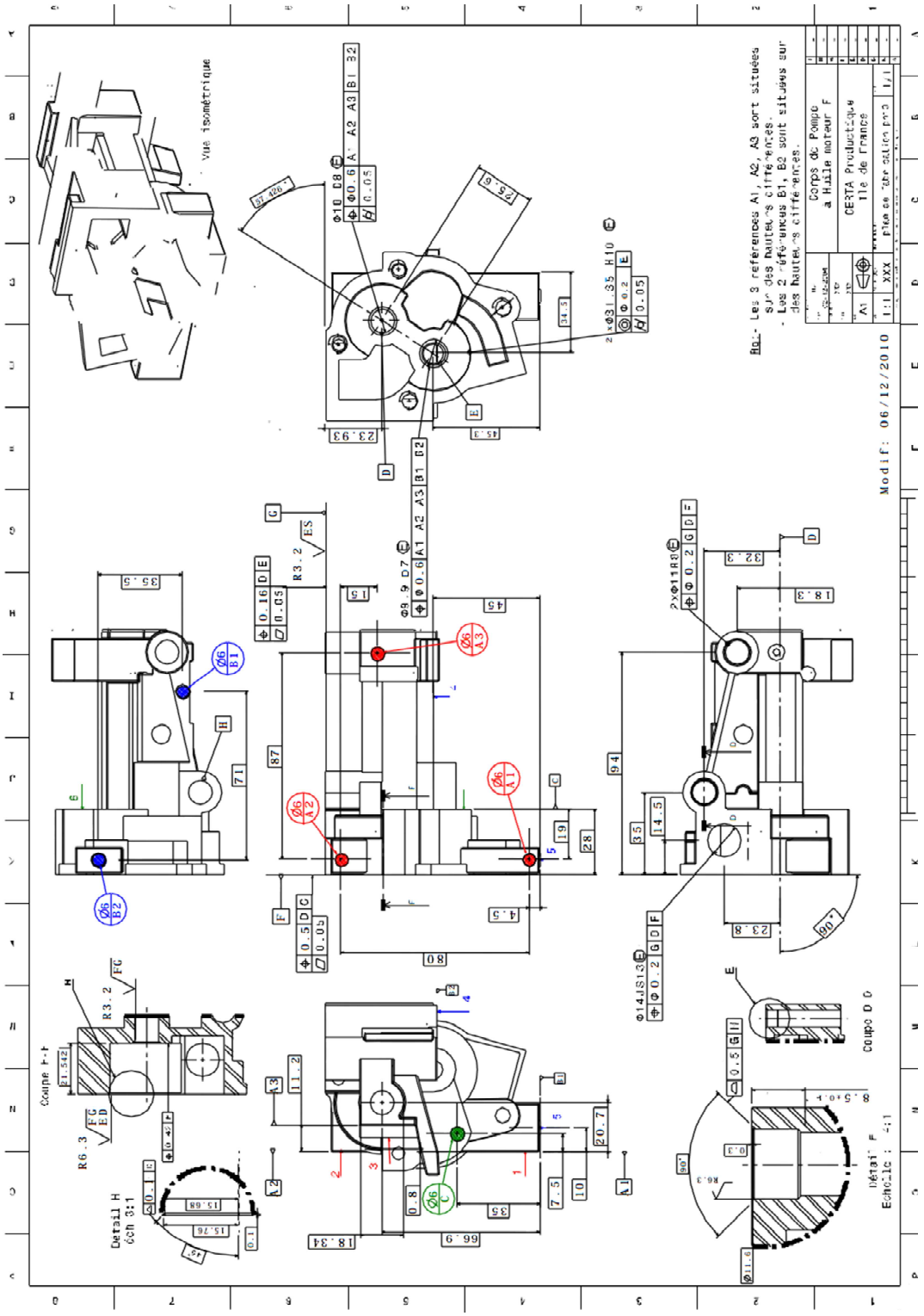
C3 : Résister aux agressions du milieu extérieur.

Annexe III - Définition de la pièce CPHC (CPHF), Corps de pompe

III.1. Plan fonctionnel

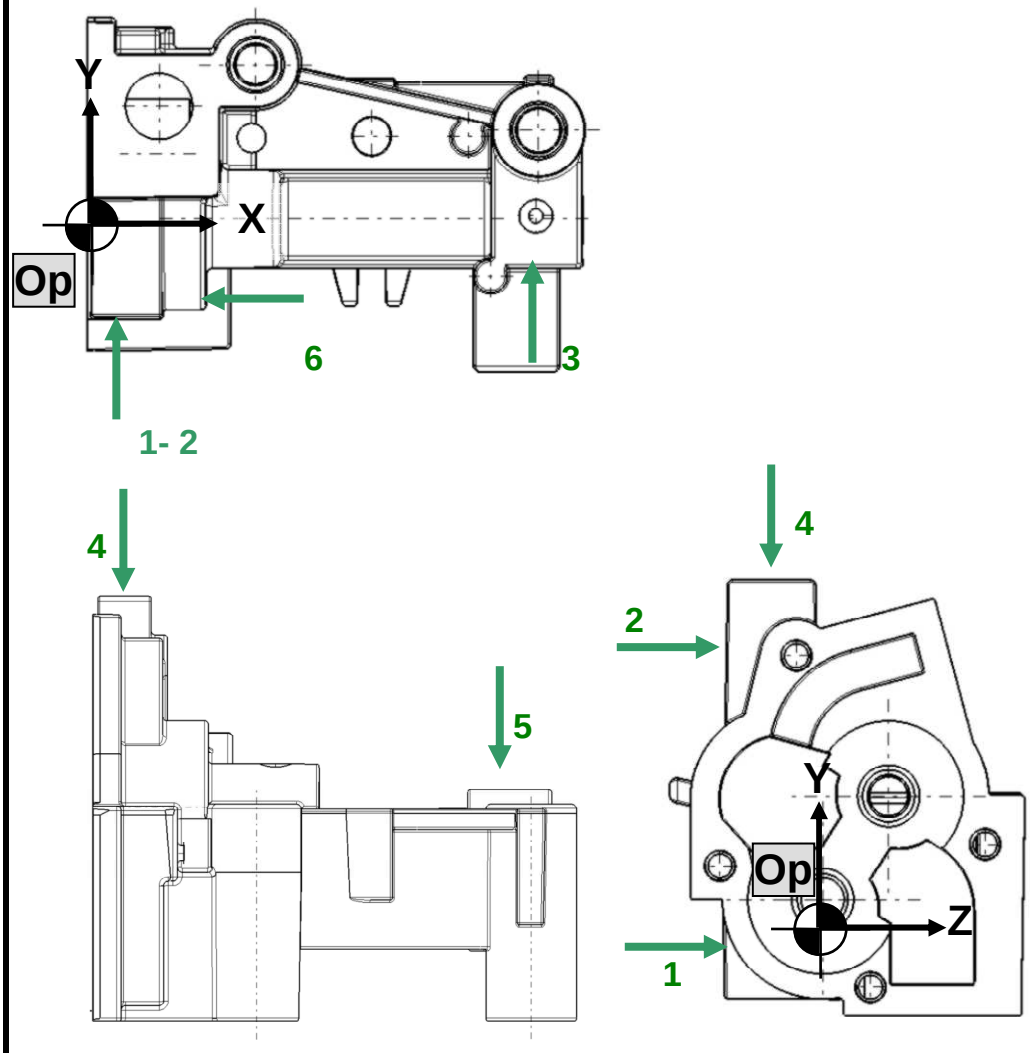


III.2. Plan fabrication



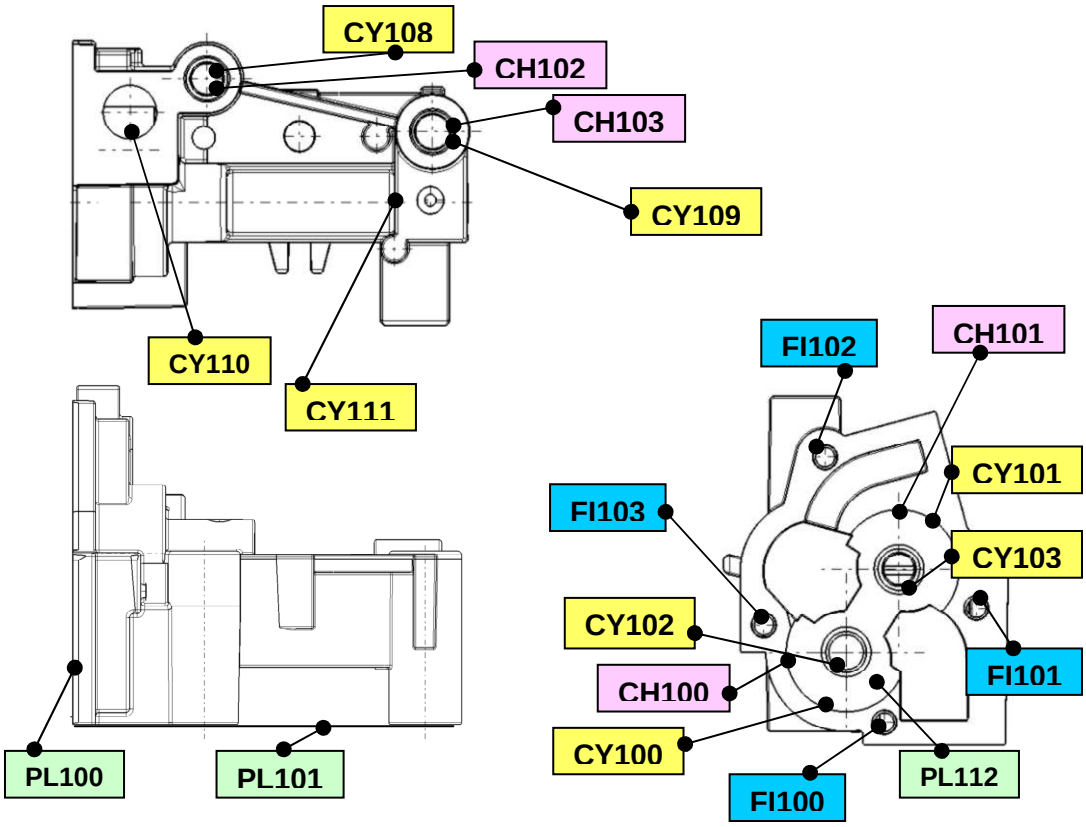
III.3. Contrat de phase

PHASE		CONTRAT DE PHASE	
N°	Désignation		
10	*FRAISAGE*		
Ensemble: *Moteur F*		**Pièce : *C.P.H.F***	Matière : *AS9U3 Y40*
Porte-pièce: *Modulaire*		Machine : *CU Urane 4 axes XYZB*	Programme:



	Définition de l'iso statisme et de l'origine programme	
N°	**Fonction**	**Technologie**
1-2-3	*Appui plan*	*Appui fixe*
4-5	*Orientation*	*Appui fixe*
6	*Butée*	*Appui fixe*

PHASE N°	PHASE Désignation	CONTRAT DE PHASE Deuxième partie de la norme	
10	*FRAISAGE*		
Ensemble: *Moteur F*		**Pièce : *C.P.H.F***	Matière : *AS9U3 Y40*
Porte-pièce: *Modulaire*		Machine : *CU Urane 4 axes XYZB*	Programme:



N°	Désignation des opérations	Outillage de coupe	N° Outil	Condition de coupe v_c	f_z axiale	f_z radiale	z
1	*Palpage position pièces OK*	*Palpeur rénishaw*	**T999**				
2	*Surfacer pl100 et pl101 en ébauche*	*Fraise à surfacer ∅63*	**T1000**	*990*		*0.11*	*5*
3	*Contourner cy110 en finition ∅14* *Contourner cy108 et cy109 en ébauche ∅11R8*	*Fraise 2T ϕ8*	**T1123**	*340*	*2.3*	*0.06*	*2*
4	*Chanfreiner cy108-cy109-cy100-cy101 0.5 à 45°*	*Fraise à chanfreiner à 45°*	**T1201**	*250*		*0.125*	*2*
5	*Contourner cy100 et cy101 en finition ∅31.35*	*Fraise ∅20*	**T1122**	*150*		*0.17*	*2*
6	*Contourner cy103 en ébauche ∅9.9D7* *Contourner cy102 en ébauche ∅10D7*	*Fraise courte ∅8.5*	**T1121**	*267*	*0.9*	*0.05*	*3*
7	*Contourner cy111 en ébauche ∅10D7*	*Fraise longue ∅8.5*	**T1120**	*27*	*0.6*	*0.13*	*3*
8	*Aléser cy108 et cy109 en finition ∅11R8*	*Tête à aléser*	**T10008**	*128*	*0.10*		*1*

9	*Aléser cy103 en finition ∅9.9D7*	*Alésoir*	**T10104**	*78*	*0.10*		*4*
10	*Aléser cy102 et cy111 en finition ∅10D7*	*Alésoir*	**T10105**	*78*	*0.10*		*4*
11	*Surfacer pl100 et pl101 en finition*	*Fraise à surfacer ∅63*	**T1000**	*990*		*0.17*	*5*
12	*Tarauder fi100 à fi103*	*Taraud M6*	**T30001**	*15*			*3*

Annexe IV – Application d'ACDE sur le cas de la pompe

1	2	3		4		5		6	7
Fonction du produit	Exigences + Critères de contrôle	Fonction (pourquoi)	Est impactée de	Fonctions Techniques Elémentaires	Impact	Spécifications pièces	Impact	Gravité de la fonction produit	Difficulté de réalisation de la fonction produit
Transformer l'énergie mécanique en énergie hydraulique	Min<Rendement global			Limite le passage du fluide entre les engrenages **et CPHC**	9	Co-axialité de cy100 avec cy102, et cy101 avec cy103 de **CPHC**	9	10	8
						Co-axialité cercle de tête des pignons par rapport aux alésages des pignons	9		
						Diamètres des cercles de tête des pignons	9		
						Diamètres des cy100 et cy101	7		
						Rectitude des axes	7		
						Perpendicularité de pl112 et pl100 par rapport aux cy102 et cy103	7		
						Parallélisme et la localisation de pl100 et pl112	3		
						Perpendicularité des deux plans des engrenages par rapport à l'alésage	3		
						Parallélisme et la localisation des deux plans des engrenages	3		
				Limite le passage du fluide entre les engrenages	8	Localisation des cy102, et de cy103 de **CPHC**	7		
						Localisation des dents de l'engrenage par rapport aux alésages	9		
						Rectitude des axes	7		
				Empêche le passage du fluide entre **CPHC** et le moteur	7	Rugosité et planéité de pl401 de moteur en contact avec **CPHC**	9		
						Rugosité et planéité PL101 de **CPHC** en contact avec le moteur	7		

				Empêche le passage du fluide entre **CPHC** et la crépine du plan	6	Rugosité et planéité de pl200 de la crépine	9		
						Rugosité et planéité de PL100 de **CPHC** (en contact avec la crépine)	7		
				Résiste les efforts de l'axe par **CPHC**	5	Rectitude des axes	7		
						Diamètres des axes	9		
						Rectitude des axes cy102 et cy103 de **CPHC**	7		
						Diamètres des axes cy102 et cy103	3		
				Résiste aux actions mécaniques dues aux frottements entre engrenages et **CPHC**	8	Co-axialité de cy100 avec cy102, et cy101 avec cy103 de **CPHC**	9		
						Co-axialité cercle de tête des pignons par rapport aux alésages des pignons	7		
						Diamètres des cercles de tête des pignons	9		
						Diamètres des cy100 et cy101	9		
						Rectitude des axes	9		
						Perpendicularité de pl112 et pl100 par rapport aux cy102 et cy103	7		
						Parallélisme et la localisation de pl100 et pl112	7		
						Perpendicularité des deux plans des engrenages par rapport à l'alésage	7		
						Parallélisme et la localisation des deux plans des engrenages	3		
Accumuler et réguler la pression d'huile HP	Min<Fuite<Max			Limite le passage du fluide via les engrenages et **CPHC**	10	Co-axialité de cy100 avec cy102, et cy101 avec cy103 de **CPHC**	9	10	8

						Co-axialité cercle de tête des pignons par rapport aux alésages des pignons	9		
						Diamètres des cercles de tête des pignons	9		
						Diamètres des cy100 et cy101	7		
						Rectitude des axes	7		
						Perpendicularité de pl112 et pl100 par rapport aux cy102 et cy103	7		
						Parallélisme et la localisation de pl100 et pl112	3		
						Perpendicularité des deux plans des engrenages par rapport à l'alésage	3		
						Parallélisme et la localisation des deux plans des engrenages	3		
				Empêche le passage du fluide entre **CPHC** et le moteur	7	Rugosité et planéité de pl401 de moteur en contact avec **CPHC**	7		
						Rugosité et planéité PL101 de **CPHC** en contact avec le moteur	9		
				Empêche le passage du fluide entre **CPHC** et la crépine du plan	7	Rugosité et planéité de pl200 de la crépine	7		
						Rugosité et planéité de PL100 de **CPHC** (en contact avec la crépine)	9		
Empêcher toutes fuites d'huile vers l'extérieur	Mettre sous pression statique de la pompe (pression d'entrée par rapport a la sortie : perte maximum de pression)			Empêche le passage du fluide entre **CPHC** et le moteur	9	Rugosité et planéité de pl401 de moteur en contact avec **CPHC**	7	8	8
						Rugosité et planéité PL101 de **CPHC** en contact avec le moteur	9		
				Empêche le passage du fluide entre **CPHC** et la crépine du plan	9	Rugosité et planéité de pl200 de la crépine	7		
						Rugosité et planéité de PL100 de **CPHC** (en contact avec la crépine)	9		

Echanger les calories entre l'huile et l'air									
Fixer et adapter la pompe sur différents moteurs	oui / non			Montabilité de **CPHC** sur le moteur	9	Parallélisme et la localisation de l'axe de cy108 et cy109 de **CPHC**	9	6	8
						Parallélisme et la localisation de l'axe de cy408 et cy409 de moteur	9		
						Planéité de pl101 de **CPHC**	7		
						Planéité de pl401 de moteur	7		
						Diamètres des axes cy108 et cy109	9		
						Diamètres des axes cy408 et cy409	9		
Motoriser la pompe (actionner la pompe) et respecter les limites de rotations	La vitesse de rotation maximale			Transmettre des actions mécaniques entre moteur et la roue dentée par l'axe	10	Rectitude de l'axe	7	8	7
						Diamètre de l'axe	9		
						Diamètre de l'alésage de la roue dentée	9		
						Perpendicularité des plans de la roue dentée par rapport à l'axe de l'alésage de la roue dentée	7		
						Géométrie des dents de la roue dentée	7		
						Co-axialité de cercle de tête et l'alésage de la roue dentée	7		
						Diamètre de cercle de tête de la roue dentée	9		

				Transmettre des actions entre l'axe et premier pignon	10	Rectitude de l'axe	9		
						Diamètre de l'axe	7		
						Diamètre de l'alésage de la roue dentée	7		
						Perpendicularité des plans de la roue dentée par rapport à l'axe de l'alésage de la roue dentée	9		
						Géométrie des dents de la roue dentée	7		
						Co-axialité de cercle de tête et l'alésage de la roue dentée	3		
						Diamètre de cercle de tête de la roue dentée	9		
				Transmettre des actions entre premier pignon et deuxième (l'axe fou)	9	Parallélisme et la localisation des deux plans des engrenages	7		
						Géométrie des dents de l'engrenage	9		
						Perpendicularité des deux plans des engrenages par rapport à l'alésage	3		
						Co-axialité cercle de tête des pignons par rapport aux alésages des pignons	7		
				Capacité de la pompe d’aspirer le fluide / refouler l'huile	8	Diamètres des cercles de tête des pignons	9		
						Géométrie des dents des engrenages	9		

					nombre des dents des engrenages	7		
					Diamètres des cy100 et cy101	9		
				Empêche le passage du fluide entre **CPHC** et le moteur	6	Rugosité et planéité de pl401 de moteur	7	
						Rugosité et planéité PL101 de **CPHC** en contact avec le moteur	9	
Assemblabilité / démontrabilité de la pompe	oui / non			montabilite de **CPHC** et la crépine	9	Perpendicularité de l'axe de fl100, fl101, fl102 et fl103 avec le pl100 de **CPHC**	7	6	8
						Perpendicularité de l'axe de fl200, fl201, fl202 et fl203 avec le pl200 de la crépine	7	
						Localisation et le diamètre des fl100, fl101, fl102, fl103 de **CPHC**	9	
						Localisation et le diamètre des fl200, fl201, fl202, fl203 de la crépine	9	
				Montabilité des axes (grand et fou) sur les pignons	8	Rectitude des axes	3	
						Diamètres des axes	9	
						Diamètres des alésages des pignons	9	
						Cylindricité des axes	7	
						Cylindricité des alésages des pignons	7	
				Montabilité des pignons sur **CPHC**	9	rectitude des axes	7	
						Diamètres des axes	9	
						Cylindricité des axes	7	

				Diamètres des axes cy102 et cy103	9		
				Cylindricité de cy102 et cy103	7		
				Perpendicularité de pl112 et pl100 par rapport aux cy102 e cy103	7		
				Perpendicularité des deux plans des engrenages par rapport à l'alésage	7		
				Diamètres des cercles de tête des pignons	9		
				Diamètres des cy100 et cy101	9		
			Montabilité des axes sur **CPHC**	7	Rectitude des axes	7	
					Diamètres des axes	9	
					Cylindricité des axes	7	
					Diamètres des axes cy102 et cy103	9	
					Rectitude des axes cy102 et cy103 de **CPHC**	9	
					Cylindricité de cy102 et cy103	7	
			Montabilité de la roue dentée sur le grand axe	6	Diamètre de l'alésage de la roue dentée	9	
					Diamètre de grand axe	9	
					Cylindricité de grand axe	7	
					Cylindricité de l'alésage de la roue dentée	7	

Résister aux agressions du milieu extérieur									

1	2	3		4		5		6	7
Fonction Technique Elémentaire	Spécifications pièces + Critères de contrôle	Fonctions du produit	Est impactée de	Opérations	Impact	Paramètres de processus	Impact	Gravité de FTE	Difficulté de réalisation de FTE
Résiste les efforts de l'axe par **CPHC**	Rectitude des axes cy102 et cy103 de **CPHC**	Transformer l'énergie mécanique en énergie hydraulique	5	Contourner cy103 en ébauche Ø 9.9D7 Contourner cy102 en ébauche Ø 10D7 (6)	8	f_z : avance radiale	9	9	6
						f_z : avance axiale	7		
						Vc : vitesse de coupe	3		
				Aléser cy103 en finition Ø 9.9D7 (9)	7	f_z : avance axiale	9		
						V_c : vitesse de coupe	7		
				Aléser cy102 et cy111 en finition Ø 10D7 (10)	7	f_z : avance axiale	9		
						V_c :vitesse de coupe	7		
	Diamètres des axes cy102 et cy103			Contourner cy103 en ébauche Ø 9.9D7 Contourner cy102 en ébauche Ø 10D7 (6)	7	f_z : avance radiale	9		
						f_z : avance axiale	3		
						V_c : vitesse de coupe	7		

				Aléser cy103 en finition Ø 9.9D7 (9)	7	f_z : avance axiale	3		
						V_c : vitesse de coupe	7		
				Aléser cy102 et cy111 en finition Ø 10D7 (10)	7	f_z : avance axiale	3		
						V_c : vitesse de coupe	7		
Montabilité de **CPHC** sur le moteur	Parallélisme et la localisation de l'axe de cy108 et cy109 de **CPHC**	Fixer et adapter la pompe sur différents moteurs	9	Contourner cy110 en finition Ø 14 Contourner cy108 et cy109 en ébauche Ø 11R8 (3)	9	f_z : avance radiale	9	6	9
						f_z : avance axiale	9		
						V_c : vitesse de coupe	7		
				Chanfreiner cy108-cy109-cy100-cy101 0.5 à 45° (4)	8	f_z : avance radiale	9		
						V_c : vitesse de coupe	7		
				Aléser cy108 et cy109 en finition Ø 11R8 (8)	7	f_z : avance axiale	9		
						V_c : vitesse de coupe	7		
	Planéité de pl101 de **CPHC**			Surfacer pl100 et pl101 en ébauche (2)	8	f_z : avance radiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	7		
				Surfacer pl100 et pl101 en finition (11)	7	f_z : avance radiale	7		

						V_c : vitesse de coupe	7		
	Diamètres des axes cy108 et cy109			Contourner cy110 en finition Ø 14 Contourner cy108 et cy109 en ébauche Ø 11R8 (3)	7	f_z : avance radiale	9		
						f_z : avance axiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	7		
				Aléser cy108 et cy109 en finition Ø 11R8 (8)	7	f_z : avance axiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	7		
Empêche le passage du fluide entre **CPHC** et le moteur	Rugosité PL100 et PL101 de **CPHC** (en contact avec moteur)	Accumuler et réguler la pression d'huile HP	7	Surfacer pl100 et pl101 en ébauche (2)	7	f_z : avance radiale	7	10	8
		Empêcher toutes fuites d'huile vers l'extérieur	9			V_c : vitesse de coupe	9		
		Transforment l'énergie mécanique en énergie hydraulique	7	Surfacer pl100 et pl101 en finition (11)	8	f_z : avance radiale	7		
		Motoriser la pompe (actionner la pompe) et respecter les limites de rotations	6			V_c : vitesse de coupe	9		
Empêche le passage du fluide entre **CPHC** et la crépine	Rugosité PL100 et PL101 de **CPHC** (en contact avec la crépine)	Accumuler et réguler la pression d'huile HP	7	Surfacer pl100 et pl101 en ébauche (2)	7	f_z : avance radiale	7	9	8
		Transforment l'énergie mécanique en énergie hydraulique	6			V_c : vitesse de coupe	9		
		Empêcher toutes fuites d'huile vers l'extérieur	9	Surfacer pl100 et pl101 en finition (11)	8	f_z : avance radiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
Résiste aux actions mécaniques dues aux frottements engrenages et **CPHC**	Co-axialité de cy100 et cy101, cy102, cy103 de **CPHC**	Transforment l'énergie mécanique en énergie hydraulique	8	Chanfreiner cy108-cy109-cy100-cy101 0.5 à 45° (4)	5	f_z : avance radiale	7	10	8
						V_c : vitesse de coupe	7		

				Contourner cy100 et cy101 en finition Ø 31.35 (5)	6	f_z : avance radiale	9		
						V_c : vitesse de coupe	7		
				Contourner cy103 en ébauche Ø 9.9D7 Contourner cy102 en ébauche Ø 10D7 (6)	6	f_z : avance radiale	9		
						f_z : avance axiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	7		
				Aléser cy103 en finition Ø 9.9D7 (9)	7	f_z : avance axiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
				Aléser cy102 et cy111 en finition Ø 10D7 (10)	7	f_z : avance axiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
				Contourner cy100 et cy101 en finition Ø 31.35 (5)	8	f_z : avance radiale	9		
						V_c : vitesse de coupe	7		
				Surfacer pl100 et pl101 en ébauche (2)	7	f_z : avance radiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	7		
				Chanfreiner cy108-cy109-cy100-cy101 0.5 à 45° (4)	5	f_z : avance radiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	7		
			Diamètres des cy100 et cy101						
			Perpendicularité de pl112 et pl100 par rapport aux cy102 et cy103						

				Contourner cy100 et cy101 en finition Ø 31.35 (5)	6	f_z : avance radiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
				Contourner cy103 en ébauche Ø 9.9D7 Contourner cy102 en ébauche Ø 10D7 (6)	6	f_z : avance radiale	9		
						f_z : avance axiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
				Aléser cy103 en finition Ø 9.9D7 (9)	8	f_z : avance axiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
				Aléser cy102 et cy111 en finition Ø 10D7 (10)	8	f_z : avance axiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
				Surfacer pl100 et pl101 en finition (11)	8	f_z : avance radiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
				Surfacer pl100 et pl101 en ébauche (2)	8	f_z : avance radiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
	Parallélisme et la localisation de pl100 et pl112			Chanfreiner cy108-cy109-cy100-cy101 0.5 à 45° (4)	6	f_z : avance radiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	7		
				Contourner cy100 et cy101 en finition Ø 31.35 (5)	7	f_z : avance radiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
				Surfacer pl100 et pl101 en finition (11)	8	f_z : avance radiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
limite le passage du fluide via les engrenages et **CPHC**	Co-axialité de cy100 et cy101, cy102, cy103 de **CPHC**	Accumuler et réguler la pression d'huile HP	10	Chanfreiner cy108-cy109-cy100-cy101 0.5 à 45° (4)	5	f_z : avance radiale	7	10	8

						V_c : vitesse de coupe	7	
				Contourner cy100 et cy101 en finition Ø 31.35 (5)	6	f_z : avance radiale	9	
						V_c : vitesse de coupe	7	
				Contourner cy103 en ébauche Ø 9.9D7 Contourner cy102 en ébauche Ø 10D7 (6)	6	f_z : avance radiale	9	
						f_z : avance axiale	7	
						V_c : vitesse de coupe	7	
				Aléser cy103 en finition Ø 9.9D7 (9)	7	f_z : avance axiale	7	
						V_c :vitesse de coupe	9	
				Aléser cy102 et cy111 en finition Ø 10D7 (10)	7	f_z : avance axiale	7	
						V_c :vitesse de coupe	9	
	Diamètres des cy100 et cy101			Contourner cy100 et cy101 en finition Ø 31.35 (5)	8	f_z : avance radiale	9	
						V_c :vitesse de coupe	7	
				Surfacer pl100 et pl101 en ébauche (2)	7	f_z : avance radiale	7	
						V_c :vitesse de coupe	7	
	Perpendicularité de pl112 et pl100 par rapport aux cy102 et cy103			Chanfreiner cy108-cy109-cy100-cy101 0.5 à 45° (4)	5	f_z : avance radiale	7	
						V_c : vitesse de coupe	7	
				Contourner cy100 et cy101 en finition Ø 31.35 (5)	6	f_z : avance radiale	7	
						V_c : vitesse de coupe	9	
				Contourner cy103 en ébauche Ø 9.9D7 Contourner cy102 en ébauche Ø 10D7	6	f_z : avance radiale	9	

				(6)		f_z : avance axiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
				Aléser cy103 en finition Ø 9.9D7 (9)	8	f_z : avance axiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
				Aléser cy102 et cy111 en finition Ø 10D7 (10)	8	f_z : avance axiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
				Surfacer pl100 et pl101 en finition (11)	8	f_z : avance radiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
	Parallélisme et la localisation de pl100 et pl112	Transforment l'énergie mécanique en énergie hydraulique	9	Surfacer pl100 et pl101 en ébauche (2)	8	f_z : avance radiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
				Chanfreiner cy108-cy109-cy100-cy101 0.5 à 45° (4)	6	f_z : avance radiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	7		
				Contourner cy100 et cy101 en finition Ø 31.35 (5)	7	f_z : avance radiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
				Surfacer pl100 et pl101 en finition (11)	8	f_z : avance radiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
Montabilité des pignons sur **CPHC**	Diamètres des axes cy102 et cy103	Assemblabilité / démontrabilité de la pompe	9	Contourner cy103 en ébauche Ø 9.9D7 Contourner cy102 en ébauche Ø 10D7 (6)	7	f_z : avance radiale	9	6	8
						f_z : avance axiale	3		
						V_c : vitesse de coupe	7		
				Aléser cy103 en finition Ø 9.9D7 (9)	7	f_z : avance axiale	3		

					V_c : vitesse de coupe	7	
				Aléser cy102 et cy111 en finition Ø 10D7 (10)	7	f_z : avance axiale	3
						V_c :vitesse de coupe	7
				Contourner cy103 en ébauche Ø 9.9D7 Contourner cy102 en ébauche Ø 10D7 (6)	8	f_z : avance radiale	9
						f_z : avance axiale	7
						V_c :vitesse de coupe	7
				Aléser cy103 en finition Ø 9.9D7 (9)	7	f_z : avance axiale	7
						V_c : vitesse de coupe	7
				Aléser cy102 et cy111 en finition Ø 10D7 (10)	7	f_z : avance axiale	7
						V_c : vitesse de coupe	7
				Surfacer pl100 et pl101 en ébauche (2)	7	f_z : avance radiale	7
						V_c : vitesse de coupe	7
				Chanfreiner cy108-cy109-cy100-cy101 0.5 à 45° (4)	5	f_z : avance radiale	7
						V_c : vitesse de coupe	7
				Contourner cy100 et cy101 en finition Ø 31.35 (5)	6	f_z : avance radiale	7
						V_c : vitesse de coupe	9
				Contourner cy103 en ébauche Ø 9.9D7 Contourner cy102 en ébauche Ø 10D7 (6)	6	f_z : avance radiale	9
						f_z : avance axiale	7
	Cylindricité de cy102 et cy103						
	Perpendicularité de pl112 et pl100 par rapport aux cy102 et cy103						

						V_c : vitesse de coupe	9		
				Aléser cy103 en finition Ø 9.9D7 (9)	8	f_z : avance axiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
				Aléser cy102 et cy111 en finition Ø 10D7 (10)	8	f_z : avance axiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
				Surfacer pl100 et pl101 en finition (11)	8	f_z : avance radiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	9		
	Diamètres des cy100 et cy101			Contourner cy100 et cy101 en finition Ø 31.35 (5)	8	f_z : avance radiale	9		
						V_c : vitesse de coupe	7		
				Contourner cy103 en ébauche Ø 9.9D7 Contourner cy102 en ébauche Ø 10D7 (6)	7	f_z : avance radiale			
						f_z : avance axiale			
						V_c : vitesse de coupe			
Montabilité des axes sur **CPHC**	Diamètres des axes cy102 et cy103	Assemblabilité / démontrabilité de la pompe	7	Aléser cy103 en finition Ø 9.9D7 (9)	7	f_z : avance axiale		6	6
						V_c : vitesse de coupe			
				Aléser cy102 et cy111 en finition Ø 10D7 (10)	7	f_z : avance axiale			
						V_c : vitesse de coupe	0,55		
	Rectitude des axes cy102 et cy103 de **CPHC**			Contourner cy103 en ébauche Ø 9.9D7 Contourner cy102 en ébauche Ø 10D7 (6)	8	f_z : avance radiale	9		
						f_z : avance axiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	3		

				Aléser cy103 en finition Ø 9.9D7 (9)	7	f_z : avance axiale	9		
						V_c : vitesse de coupe	7		
				Aléser cy102 et cy111 en finition Ø 10D7 (10)	7	f_z : avance axiale	9		
						V_c : vitesse de coupe	7		
				Contourner cy103 en ébauche Ø 9.9D7 Contourner cy102 en ébauche Ø 10D7 (6)	8	f_z : avance radiale	9		
						f_z : avance axiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	7		
	Cylindricité de cy102 et cy103			Aléser cy103 en finition Ø 9.9D7 (9)	7	f_z : avance axiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	7		
				Aléser cy102 et cy111 en finition Ø 10D7 (10)	7	f_z : avance axiale	7		
						V_c : vitesse de coupe	7		
Capacité de la pompe d'aspirer le fluide / refouler l'huile	Diamètres des cy100 et cy101	Motoriser la pompe (actionner la pompe) et respecter les limites de rotations	8	Contourner cy100 et cy101 en finition Ø 31.35 (5)	8	f_z : avance radiale	9	8	4
						V_c : vitesse de coupe	7		
Montabilité de **CPHC** et la crépine	Perpendicularité de l'axe de fl100, fl101, fl102 et fl103 avec le pl100 de **CPHC**	Assemblabilité / démontrabilité de la pompe	9	Surfacer pl100 et pl101 en ébauche (2)	7	f_z : avance radiale	9	6	8
						V_c : vitesse de coupe	7		
				Surfacer pl100 et pl101 en finition (11)	7	f_z : avance radiale	9		
						V_c : vitesse de coupe	7		
				Tarauder fi100 à fi103 (12)	8	V_c : vitesse de coupe	9		
	Localisation et le diamètre des fl100, fl101, fl102, fl103 de **CPHC**			Tarauder fi100 à fi103 (12)	7	V_c : vitesse de coupe	7		

1	2	3		4		5		6	7
Opération de processus	Paramètres de processus + Critères d'inspection	Fonctions Techniques Elémentaires	Est impactée de	Comment	Impact	Comment (quantitatif)	Impact	Gravité d'opération	Difficulté de réalisation d'opération
Surfacer pl100 et pl101 en ébauche (2)	f_z : avance radiale	Montabilité de **CPHC** sur moteur	8					10	7
		Empêche le passage du fluide entre **CPHC** et le moteur	7						
		Empêche le passage du fluide entre **CPHC** et la crépine	7						
		Résiste aux actions mécaniques dues aux frottements engrenages et **CPHC**	8						
	V_c : vitesse de coupe	Limite le passage du fluide via les engrenages et **CPHC**	8						
		Montabilité des pignons sur **CPHC**	7						
		Montabilité de **CPHC** et la crépine	7						
Contourner cy110 en finition Ø 14 Contourner cy108 et cy109 en ébauche Ø 11R8 (3)	f_z : avance radiale	Montabilité de **CPHC** sur moteur	9					6	9
	f_z : avance axiale								
	V_c : vitesse de coupe								
Chanfreiner cy108-cy109-cy100-cy101 0.5 à 45°(4)	f_z : avance radiale	Montabilité de **CPHC** sur moteur	8					9	7
		Résiste aux actions mécaniques dues aux frottements engrenages et **CPHC**	6						
	V_c : vitesse de coupe	Limite le passage du fluide via les engrenages et **CPHC**	6						
		Montabilité des pignons sur **CPHC**	5						
Contourner cy100 et cy101 en finition Ø31.35 (5)	f_z : avance radiale	Résiste aux actions mécaniques dues aux frottements engrenages et **CPHC**	8					10	5
		Limite le passage du fluide via les engrenages et **CPHC**	8						
	V_c : vitesse de coupe	Montabilité des pignons sur **CPHC**	8						

		Capacité de la pompe d'aspirer le fluide / refouler l'huile	8						
Contourner cy103 en ébauche Ø 9.9D7 Contourner cy102 en ébauche Ø 10D7 (6)	f_z : avance radiale	Résiste les efforts de l'axe par **CPHC**	8					9	7
	f_z : avance axiale	Résiste aux actions mécaniques dues aux frottements engrenages et **CPHC**	6						
		Limite le passage du fluide via les engrenages et **CPHC**	6						
	V_c : vitesse de coupe	Montabilité des pignons sur **CPHC**	8						
		Montabilité des axes sur **CPHC**	8						
Aléser cy108 et cy109 en finition Ø 11R8 (8)	f_z : avance axiale	Montabilité de **CPHC** sur moteur	7					6	9
	V_c : vitesse de coupe								
Aléser cy103 en finition Ø 9.9D7 (9)	f_z : avance axiale	Résiste les efforts de l'axe par **CPHC**	7					10	7
		Résiste aux actions mécaniques dues aux frottements engrenages et **CPHC**	8						
	V_c : vitesse de coupe	Limite le passage du fluide via les engrenages et **CPHC**	8						
		Montabilité des pignons sur **CPHC**	8						
		Montabilité des axes sur **CPHC**	7						
Aléser cy102 et cy111 en finition Ø 10D7 (10)	f_z : avance axiale	Résiste les efforts de l'axe par **CPHC**	7					10	7
		Résiste aux actions mécaniques dues aux frottements engrenages et **CPHC**	8						
	V_c : vitesse de coupe	Limite le passage du fluide via les engrenages et **CPHC**	8						
		Montabilité des pignons sur **CPHC**	8						
		Montabilité des axes sur **CPHC**	7						
Surfacer pl100 et pl101 en finition (11)	f_z : avance radiale	Montabilité de **CPHC** sur moteur	7					10	9
		Empêche le passage du fluide entre **CPHC** et le moteur	8						
		Empêche le passage du fluide entre **CPHC** et la crépine	8						

	V_c : vitesse de coupe	Résiste aux actions mécaniques dues aux frottements engrenages et **CPHC**	8						
		Limite le passage du fluide via les engrenages et **CPHC**	8						
		Montabilité des pignons sur **CPHC**	8						
		Montabilité de **CPHC** et la crépine	7						
Tarauder fi100 à fi103 (12)	V_c : vitesse de coupe	Montabilité de **CPHC** et la crépine	8					6	5

SYSTEME D'AIDE A LA DECISION POUR LA GENERATION DES PLANS D'INSPECTION PAR LA FEDERATION DES EXPERTISES METIER

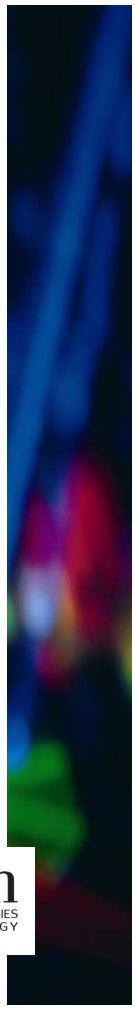
RESUME : Dans le contexte économique et compétitif actuel, ce qui permet aux entreprises de se distinguer c'est leur réactivité à fournir des produits de plus en plus complexes en répondant à des besoins toujours plus diversifiés. Pour faire face à cette exigence de réactivité et malgré ces contraintes, les approches d'ingénierie intégrée sont apparues pour une meilleure gestion du cycle de vie des produits. Dans ce contexte la prise en compte des variabilités et leurs interdépendances a été démontrée comme étant indispensable à l'amélioration des performances (coût, risque, qualité, …). Ce travail de recherche est consacré à l'élaboration d'un plan d'inspection optimal pour : la maîtrise de ces variabilités et leurs effets sur le comportement du produit, l'usage et les fonctionnalités de celui-ci. Pour cela un cadre méthodologique pour la co-conception des activités de contrôles de conformités et celles de suivi de fabrication a été formalisé. Ce cadre permet une prise de décision opérationnelle grâce à l'utilisation des outils opérationnels et assure la satisfaction des objectifs stratégiques (réduction des coûts, amélioration de la qualité, augmentation de la productivité, …). Suite à une synthèse approfondie de la littérature relative à la planification la qualité et de l'amélioration (conjointe) de la performance, les outils AMDEC, KC flowdown, et Activity Based Costing (ABC) ont été retenus. Cependant ces outils présentent certains manques à combler et ont fait donc l'objet de certaines modifications (adaptations) pour convenir au mieux aux besoins du cadre méthodologique proposé. L'intégration d'AMDEC et de KC flowdown a abouti à un nouvel outil nommé ACDE (Analyse de la Causalité, des Défaillances, et leurs Effets). Ainsi l'adaptation d'ABC à l'estimation de coût de la qualité par « Quality-Driven ABC » a été proposée. L'application de ces derniers a été proposée dans le cadre de la planification d'inspection « au juste nécessaire ».

Mots clés : plan d'inspection, suivi de fabrication, contrôle de conformité, caractéristiques clés, maîtrise des risques, prise de décision, AMDEC, KC flowdown, ABC.

DECISION SUPPORT SYSTEM FOR INSPECTION PLAN GENERATION BY THE FEDERATION OF BUSINESS EXPERTISE.

ABSTRACT : In the current economic and competitive environment, what distinguishes the companies is their reactivity to provide increasingly complex products for increasingly diverse needs. To achieve this reactivity despite constraints, integrated engineering approachs have emerged to better manage and organize the product life cycle. In this context, it is essential to take into account the characteristics' variations and their interdependencies to improve the performance (cost, risk, quality ...). This thesis is devoted to the generation of an optimal inspection plan including process variations monitoring and product variations control. A methodological framework for the co-conception of product control and process monitoring activities has been formalized and validated. This framework allows operational decision-making by the intervention of operational tools and ensures the satisfaction of strategic objectives (cost reduction, improved quality, increased productivity ...). FMEA, KC flowdown, and Activity Based Costing (ABC) were selected following a comprehensive literature review on quality planning and performance improvement. However, these tools present some lack to fill up and therefore are subjected to certain adaptations in order to best fit the needs of the proposed methodological framework. Integration of FMEA and KC flowdown resulting in a new tool called ACDE. As well the adaptation of ABC to estimate the cost of quality by "Quality-Driven ABC" is proposed. The application of these latter has been proposed to limit the inspection planning to "bare essentials activities".

Keywords : inspection plan, process monitoring, conformity control, key characteristics, risk management, decision making, FMEA, KC flowdown, ABC.



ARTS ET MÉTIERS ParisTech

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY