

THESE DE DOCTORAT

Présentée à

**L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE
LILLE**

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LILLE 1

Discipline: Automatique, Génie Informatique, Traitement du Signal et Images

Par

Brahim LAOUISSET

**Système intelligent d'aide à la conception pour le développement
de procédés et de produits industriels : application à la maîtrise
de procédé d'aiguilletage et à l'étude de biocomposites**

Le 29 novembre 2013, devant la commission d'examen

| | | |
|--------------------|--|-----------------------|
| M Nicolai Christov | Professeur, Université de Lille 1 | Président du jury |
| Mme Laure Morel | Professeur, Université de Lorraine | Rapporteur |
| M Stephane Negny | Professeur, INP-ENSIACET | Rapporteur |
| M Mauricio Carmago | Professeur, Université de Lorraine | Examineur |
| M Cyril Laine | Docteur, Ecole des Mines de Douai | Examineur |
| M Xianyi Zeng | Professeur, ENSAIT, Roubaix | Directeur de thèse |
| M Philippe Vroman | Maître de conférences, ENSAIT, Roubaix | Co-directeur de thèse |

Remerciements

Le travail de recherche présenté dans ce manuscrit a été réalisé au sein du laboratoire de recherche GEMTEX (Génie des Matériaux Textiles) de l'ENSAIT (Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles) de Roubaix.

Ce travail m'a permis de démontrer l'intérêt du développement des systèmes d'aide à la conception pour le développement de nouveaux procédés et de nouveaux produits. Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de recherche, Monsieur Xianyi Zeng, Professeur des universités à l'ENSAIT pour m'avoir fait confiance, dirigé et soutenu tout au long de ma thèse. Ses conseils et ses encouragements bienveillants m'ont été très précieux pour accomplir mon travail et rédiger ce mémoire. Je remercie vivement Monsieur Philippe Vroman, Maître de Conférences à l'ENSAIT, pour avoir supervisé cette thèse avec un regard critique et prodigué des conseils avisés. Ses connaissances et sa générosité m'ont permis de découvrir le monde passionnant du textile, particulièrement le domaine du nontissé.

Je remercie aussi le personnel du Centre Européen du NonTissé (CENT). En particulier Philippe VAN Coetsem et Michel Caucheteux pour m'avoir permis de fabriquer des échantillons de matériaux pour le développement de nouveaux procédés et produits et pour leurs conseils professionnels.

J'adresse tout spécialement mes remerciements au Ministère de l'Industrie, pour avoir supporté financièrement cette thèse dans le cadre du projet FUI NWC-X.

Je remercie également tous les partenaires du projet NWC-X, pour m'avoir fourni toutes les informations nécessaires pour la réalisation et la mise en œuvre de mes travaux. En particulier Monsieur Guy Leroy, Inventeur de machine d'aiguilletage pour ses conseils précieux dans le domaine d'aiguilletage.

J'exprime mes remerciements à tous les doctorants du laboratoire GEMTEX, ainsi que l'équipe d'enseignants chercheurs et le personnel de l'ENSAIT pour leur accueil, leurs renseignements pratiques et leur contribution au bon déroulement de mon travail de recherche, durant mes quatre années de vie professionnelle en tant que doctorant.

Bien évidemment, je ne voudrais pas oublier les doctorants, étudiants et stagiaires de l'école, pour leur aide et contribution dans le développement du projet, en particulier W. Najjar, A. Hammouda, A. Labaniya, A. Alruhban, J. Elfehri, M. Aouraghe, M. Ashraf, N. Saad, O. Ezzar, G. Gonca et D. Hutloff.

Enfin, un grand merci à toute ma famille et mes amis pour m'avoir supporté et encouragé tout au long de cette thèse. En particulier ma mère, ma femme, mes frères et sœur.

Table des matières

| | |
|---|----------|
| Introduction générale et problématique | 1 |
| Chapitre 1 - Concepts de base | 4 |
| 1.1. Introduction | 4 |
| 1.2. Aide à la décision | 5 |
| 1.2.1. Les problématiques d'aide à la décision | 5 |
| 1.2.2. Les étapes de l'aide à la décision | 6 |
| 1.2.3. Les étapes de la modélisation | 9 |
| 1.2.4. Les différentes méthodes d'aide à la décision | 12 |
| 1.2.4.1. Les méthodes de l'approche de surclassement de synthèse | 13 |
| 1.2.4.2. Méthodes de l'approche du critère unique de synthèse..... | 15 |
| 1.2.4.3. Comparaison des méthodes | 17 |
| 1.3. Développement d'outils d'aide à la conception | 18 |
| 1.3.1. Conception de produits industriels et de matériaux multifonctionnels..... | 18 |
| 1.3.2. Outils d'aide à la conception..... | 19 |
| 1.3.3. Les outils du système d'aide à la conception..... | 21 |
| 1.3.3.1. Outil 1 : Sélection et analyse des facteurs de conception pertinents..... | 21 |
| 1.3.3.2. Outil 2 : Détermination de l'espace de fonctionnement..... | 22 |
| 1.3.3.3. Outil 3 : Evaluation multicritère et hiérarchique..... | 23 |
| 1.4. Problèmes rencontrés dans le développement d'outils d'aide à la conception | 24 |
| 1.4.1. Problème de traitement des variables qualitatives | 24 |
| 1.4.2. Problème d'intégration de la connaissance humaine | 26 |
| 1.5. Techniques de calcul utilisées pour développement des outils d'aide à la conception..... | 27 |
| 1.5.1. La logique floue | 27 |
| 1.5.1.1. Notion de base | 27 |
| 1.5.1.2. Fonction d'appartenances | 27 |
| 1.5.1.3. Règles floues | 29 |
| 1.5.1.4. Principe générale d'une commande par logique floue | 29 |
| 1.5.1.5. Avantages et inconvénients de la logique floue | 30 |
| 1.5.2. Analyse factorielle | 30 |
| 1.5.2.1. Analyse en composantes principales (ACP) | 31 |
| 1.5.2.2. Analyse des Correspondance Multiples (ACM) | 32 |
| 1.5.3. Arbre de décision | 33 |
| 1.5.4. Les cartes de Kohonen | 34 |
| 1.6. Applications à la conception des composites textiles | 37 |
| 1.7. Conclusion..... | 38 |

| | |
|--|-----------|
| Chapitre 2 - Développement d'un système intelligent d'aide à la conception | 40 |
| 2.1. Introduction | 40 |
| 2.2. Aide à la conception des matériaux composites/textiles | 40 |
| 2.3. Architecture informatique du système d'aides à la conception..... | 42 |
| 2.3.1. Diagrammes de UML | 42 |
| 2.3.1.1. Diagramme de cas d'utilisation..... | 42 |
| 2.3.1.2. Diagramme de classe simplifié | 45 |
| 2.3.2. Architecture DIC (Donnée / Interface / Contrôle) | 46 |
| 2.4. Présentation des travaux existants | 48 |
| 2.4.1. Contrôle 1 : Sélection et analyse des facteurs de conception les plus pertinents.... | 48 |
| 2.4.2. Contrôle 2 : Détermination des espaces de fonctionnement | 51 |
| 2.4.3. Contrôle 3 : Evaluation multicritère et hiérarchique..... | 55 |
| 2.5. Prise en compte de la connaissance humaine et des variables qualitatives..... | 58 |
| 2.5.1. Modélisation avec les arbres de décision | 59 |
| 2.5.2. Modélisation avec les cartes de Kohonen | 64 |
| 2.6. Conclusion..... | 71 |
| | |
| Chapitre 3 - Application à la maîtrise de procédé : étude du transfert de fibres dans un procédé d'assemblage de structures nontissées par aiguilletage | 72 |
| 3.1. Introduction | 72 |
| 3.2. Description des matériaux utilisés : Les nontissés aiguilletés..... | 73 |
| 3.2.1. Définition | 73 |
| 3.2.2. Procédé d'aiguilletage..... | 73 |
| 3.2.2.1. Définition | 73 |
| 3.2.2.2. Présentation de la ligne de fabrication cardage et aiguilletage | 75 |
| 3.2.3. Principaux paramètres d'aiguilletage..... | 76 |
| 3.3. Etude de l'association type de fibre / type d'aiguille | 78 |
| 3.3.1. Formalisation de l'étude | 79 |
| 3.3.2. Plan d'expériences réalisé..... | 79 |
| 3.3.3. Facteurs du plan d'expériences (facteur de conception)..... | 80 |
| 3.3.3.1. Variable X_1 / Matières premières : Type de fibre..... | 80 |
| 3.3.3.2. Variable X_3 / Matières premières : Finesse des fibres | 81 |
| 3.3.3.3. Variable X_6 / Paramètres procédé : Type d'aiguille | 81 |
| 3.3.3.4. Variables X_7 et X_9 / Paramètres procédé : Profondeur de pénétration et pas d'avance | 82 |
| 3.3.3.5. Référencement des échantillons générés..... | 83 |
| 3.3.4. Réponses du plan d'expériences (critères qualité)..... | 83 |
| 3.3.4.1. Variable Y_1 : Variations d'épaisseur | 84 |
| 3.3.4.2. Variable Y_3 : Résistance au délaminage | 84 |
| 3.3.4.3. Variable Y_4 : Observation visuelle du transfert des fibres..... | 86 |
| 3.3.4.4. Hypothèses sur la qualité de transfert des fibres | 88 |
| 3.4. Modélisation pour la détermination de l'association fibres/aiguilles pour assurer le meilleur transfert des fibres | 88 |

| | |
|---|------------|
| 3.4.1. Analyse de la sensibilité des facteurs de conception | 90 |
| 3.4.2. Etude des relations de correspondance et de corrélation entre les variables | 93 |
| 3.5. Modélisation pour l'estimation de la quantité de fibres transportées par le procédé d'aiguilletage | 98 |
| 3.5.1. Sélection des paramètres de l'aiguille les plus pertinents..... | 99 |
| 3.5.2. Modèles analytiques disponibles dans la littérature..... | 102 |
| 3.5.3. Analyse expérimentale : quantification manuelle du nombre de fibres transférées | 105 |
| 3.5.4. Comparaison entre les modèles théoriques et analyse expérimentale pour l'estimation des fibres transportées..... | 107 |
| 3.5.5. Amélioration des modèles théoriques | 108 |
| 3.6. Conclusion..... | 111 |
| | |
| Chapitre 4 - Application au développement de produits : étude des relations propriété/structure de biocomposites thermoplastiques..... | 113 |
| 4.1. Introduction | 113 |
| 4.2. Description des matériaux utilisés : les biocomposites | 114 |
| 4.2.1. Définition | 114 |
| 4.2.2. Mise en œuvre et présentation des produits | 114 |
| 4.2.2.1. Fibres de renfort utilisées (Étoupe/Lin 80/Lin 120/ Lin affiné)..... | 114 |
| 4.2.2.2. Résines utilisées (PP/PLA/PA11) | 115 |
| 4.2.2.3. Procédé de fabrication des biocomposites..... | 115 |
| 4.3. Méthodes de caractérisation des matériaux composites..... | 116 |
| 4.3.1. Résistances mécaniques | 117 |
| 4.3.1.1. Contrainte de traction | 117 |
| 4.3.1.2. Module en flexion | 117 |
| 4.3.1.3. Résistance au choc (Impact)..... | 118 |
| 4.3.2. Propriétés acoustiques : absorption acoustique..... | 119 |
| 4.4. Etude de l'influence des paramètres de structure (facteurs de conception) | 120 |
| 4.4.1. Etudes des corrélations et des correspondances entre les variables..... | 122 |
| 4.4.2. Analyse de sensibilité et de pertinence des facteurs de conception..... | 125 |
| 4.4.3. Etude de performance du type de résine et du type de renfort..... | 128 |
| 4.4.3.1. Etude de performance du type de résine | 128 |
| 4.4.3.2. Etude de performance du type de renfort | 134 |
| 4.5. Détermination des espaces de fonctionnement les plus pertinents..... | 138 |
| 4.6. Evaluation multicritère des produits | 145 |
| 4.7. Conclusion..... | 149 |
| | |
| Conclusion générale et perspectives | 150 |
| Glossaire | 152 |
| Bibliographie | 153 |
| Annexes..... | 160 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1.1. Démarche générale de l'aide à la décision..... | 6 |
| Figure 1.2. Représentation du processus détaillé d'aide à la décision | 8 |
| Figure 1.3. Démarche générale de la modélisation | 9 |
| Figure 1.4. Différents types de critères | 13 |
| Figure 1.5. Les étapes de la méthode de classement PROMETHEE | 14 |
| Figure 1.6. Structure hiérarchique d'un problème selon la méthode AHP | 16 |
| Figure 1.7. Démarche générale pour la conception des matériaux fibreux multifonctionnels. | 19 |
| Figure 1.8. Démarche générale pour l'aide à la conception..... | 20 |
| Figure 1.9. Modèle des relations entre les critères de qualité et les facteurs de conception | 21 |
| Figure 1.10. Types de variable | 25 |
| Figure 1.11. Étapes clefs et répartition du temps passé avec les experts métier | 26 |
| Figure 1.12. Fonction caractéristique et fonction d'appartenance | 28 |
| Figure 1.13. Fonction d'appartenance, variable et terme linguistique | 28 |
| Figure 1.14. Structure conventionnelle d'une commande floue | 29 |
| Figure 1.15. Schéma général d'un arbre de décision | 33 |
| Figure 1.16. Réseau de Kohonen | 35 |
| Figure 1.17. Activation d'un neurone d'un réseau de Kohonen | 36 |
| | |
| Figure 2. 1. Structure générale du système développé | 41 |
| Figure 2. 2. Intervention du système d'aide à la conception dans le processus de développement de structures nontissées et composites..... | 42 |
| Figure 2. 3. Diagramme de cas d'utilisation | 43 |
| Figure 2. 4. Scénarios de réalisation des trois principaux cas d'utilisation du système..... | 45 |
| Figure 2. 5. Diagramme de classe simplifié du système | 45 |
| Figure 2. 6. Affichage d'une instance de l'objet « Aiguille »..... | 46 |
| Figure 2. 7. Architecture DIC (Donnée, Interface, Contrôle) | 46 |
| Figure 2. 8. Interface d'accueil du système d'aide à la conception..... | 47 |
| Figure 2. 9. Outils d'aide à la conception utilisés | 48 |
| Figure 2. 10. Génération du critère de pertinence global | 49 |
| Figure 2. 11. Fonctions d'appartenance $SF_{k,l}$, $CCH_{k,l}$ et $CPG_{k,l}$ | 50 |
| Figure 2. 12. Interface pour la visualisation des facteurs de conception les plus pertinents avec leurs critères de pertinence | 50 |
| Figure 2. 13. Fonction d'appartenance proposée pour estimer le degré d'acceptabilité d'un prototype pour un critère de qualité spécifique. | 51 |
| Figure 2. 14. Conversion des facteurs de conception en variables orthogonales..... | 52 |
| Figure 2. 15. Intervalles proposés pour la recherche de l'espace de fonctionnement pertinent | 53 |
| Figure 2. 16. Définition de l'espace de fonctionnement faisable..... | 54 |
| Figure 2. 17. Exemple d'une interface pour la visualisation des intervalles de fonctionnements pour un facteur de conception | 54 |

| | |
|---|----|
| Figure 2. 18. Structure hiérarchique générale pour l'évaluation globale des prototypes | 55 |
| Figure 2. 19. Exemple d'agrégation floue de deux indicateurs, quantitative et qualitative | 57 |
| Figure 2. 20. Structure générale d'un arbre de décision refaire | 61 |
| Figure 2. 21. Fonction d'acceptabilité pour le critère qualité « Absorption acoustique » | 62 |
| Figure 2. 22. Un exemple des règles les plus pertinentes R_{ij} extraites de l'arbre de décision. | 62 |
| Figure 2. 23. Deux unités d'une carte de Kohonen | 65 |
| Figure 2. 24. Exemple d'une carte de Kohonen, pour le facteur de conception « Epaisseur » par rapport au critère qualité « Absorption acoustique » | 69 |
| Figure 2. 25. Carte de Kohonen obtenu après le tri des cellules par rapport aux facteurs de conception : « Epaisseur » en fonction « type d'aiguille » | 70 |
| Figure 2.26. Courbe ROC pour les deux modèles Arbre de décision (C4.5) et carte de Kohonen (SOM) | 70 |
| | |
| Figure 3. 1. Machine d'aiguilletage | 73 |
| Figure 3. 2. Schéma de principe d'aiguilletage à 90° (capture des fibres par les aiguilles)..... | 74 |
| Figure 3. 3. Aiguille à feutrer conventionnelle pour aiguilletage | 74 |
| Figure 3. 4. Différents types d'aiguilles pour l'industrie des nontissés | 75 |
| Figure 3. 5. Ligne voie sèche cardé/aiguilleté..... | 76 |
| Figure 3. 6. Assemblage par aiguilletage perpendiculaire des nontissés bicouche | 76 |
| Figure 3. 7. Identification de paramètres d'aiguilletage (facteurs) qui influencent la qualité de transfert des fibres (critères qualités) | 77 |
| Figure 3. 8. Techniques de modélisation utilisées pour modéliser le transfert de fibres pendant l'opération d'aiguilletage | 78 |
| Figure 3. 9. Aiguilletage d'une structure nontissée bicouche pour l'étude de transfert de fibres | 79 |
| Figure 3. 10. Modèle simplifié des relations qualité de transfert des fibres en fonction des fibres et des aiguilles. | 80 |
| Figure 3. 11. Fonction d'acceptabilité associée au critère qualité Y_1 (variation épaisseur) | 84 |
| Figure 3. 12. Test de résistance au délaminage | 85 |
| Figure 3. 13. Résultat d'un test de résistance au délaminage obtenu avec les trois aiguilles A, B et C pour la fibre F5..... | 85 |
| Figure 3. 14. Fonction d'acceptabilité associée au critère qualité Y_3 (Résistance au délaminage) | 86 |
| Figure 3. 15. Observation visuelle du transfert de fibres pour le mélange de fibres F5, dans le cas des aiguilles A, B, C et D, pour les quatre combinaisons de paramètre procédé..... | 87 |
| Figure 3. 16. Interface logicielle pour la classification automatique de l'observation visuelle de transfert de fibre | 87 |
| Figure 3. 17. Fonction d'acceptabilité associée au critère qualité Y_4 (Observation visuelle) .. | 88 |
| Figure 3. 18. Démarche générale de l'étude..... | 89 |
| Figure 3. 19. Acquisition et formalisation de données..... | 90 |
| Figure 3. 20. Interface présentant les résultats de la sensibilité floue pour la variable de sortie Y_4 (observation visuelle) | 91 |
| Figure 3. 21. Une partie de l'arbre de décision généré pour la variable de sortie Y_1 | 91 |

| | |
|--|-----|
| Figure 3. 22. Une partie de l'arbre de décision généré pour la variable de sortie Y_3 | 92 |
| Figure 3. 23. Une partie de l'arbre de décision généré pour la variable de sortie Y_4 | 92 |
| Figure 3. 24. ACP pour l'étude de corrélation entre les variables | 94 |
| Figure 3. 25. ACM pour les deux variables type d'aiguilles et type de fibre par rapport à l'observation visuelle | 95 |
| Figure 3. 26. Carte de Kohonen relative à la variable « type d'aiguille » par rapport à la variable « Observation visuelle » | 98 |
| Figure 3. 27. Modèle générale pour l'étude du comportement d'une aiguille relativement à la qualité de transfert des fibres pendant l'opération d'aiguilletage | 99 |
| Figure 3. 28. Une partie de l'arbre de décision associé au modèle générale pour l'étude du comportement des aiguilles..... | 100 |
| Figure 3. 29. Présentation des paramètres les plus pertinents d'une aiguille..... | 101 |
| Figure 3. 30. Barbe active et non active d'une aiguille à l'intérieure de la zone travaillante | 101 |
| Figure 3. 31. Estimations des fibres collectées par une barbe selon la formule de Brunschweiler..... | 102 |
| Figure 3. 32. Illustration des fibres capturées par une barbe pour une aiguille triangulaire .. | 103 |
| Figure 3. 33. Estimations des barbes actives et inactives pour une aiguille..... | 104 |
| Figure 3. 34. Analyse expérimentale pour quantifier le nombre de fibres transportées-faisceau de fibres aiguilletées..... | 105 |
| Figure 3. 35. Analyse expérimentale pour quantifier le nombre de fibres transportées-nombre d'impacts sur la couche supérieure du nontissé aiguilleté | 106 |
| Figure 3. 36. Comparaison entre les valeurs théoriques et expérimentales des impacts par cm^2 | 107 |
| Figure 3. 37. Interface logicielle pour le calcul de fibres transportées avec les modèles théoriques | 107 |
| Figure 3. 38. Comparaison des résultats d'un modèle théorique avec l'analyse expérimentale | 108 |
| Figure 3. 39. Différent types de saillie de barbe d'une aiguille | 109 |
| Figure 3. 40. Coefficient de transfert de fibre pour chaque barbe par niveau..... | 110 |
| Figure 3. 41. Comparaison des résultats de transfert de fibres des modèles avant et après amélioration avec l'analyse expérimentale | 111 |
| Figure 3.42. Arbre de décision généré pour la variable de sortie Y_7 (Variation d'épaisseur) | 159 |
| Figure 3.43. Arbre de décision généré pour la variable de sortie Y_3 (Résistance au délaminage)..... | 161 |
| Figure 3.44. Arbre de décision généré pour la variable de sortie Y_4 (Observation visuelle)... | 164 |
| Figure 3.45. ACM pour les deux variables type d'aiguilles et type de fibre par rapport à la variation épaisseur..... | 166 |
| Figure 3.46. ACM pour les deux variables type d'aiguilles et type de fibre par rapport à la résistance au délaminage..... | 166 |

| | |
|--|-----|
| Figure 4. 1. Les différents types de fibre de lin mises en œuvre dans la fabrication des composites | 115 |
| Figure 4. 2. Les différents types de résines mises en œuvre sous forme de fibres dans la fabrication des composites | 115 |
| Figure 4. 3. Procédé de fabrication des composites par thermo-compression | 116 |
| Figure 4. 4. Fonction d'acceptabilité associée au critère qualité « Contrainte de traction ».. | 117 |
| Figure 4. 5. Fonction d'acceptabilité associée au critère qualité « Module en flexion »..... | 118 |
| Figure 4. 6 . Fonction d'acceptabilité associée au critère qualité « Résistance choc »..... | 119 |
| Figure 4. 7. Mesure de la propriété acoustique : Absorption acoustique | 120 |
| Figure 4. 8. Fonction d'acceptabilité associée au critère qualité « Absorption acoustique » | 120 |
| Figure 4. 9. Modèle proposé pour l'analyse des biocomposites | 121 |
| Figure 4. 10. ACP associée a l'étude des biocomposites | 122 |
| Figure 4. 11. ACM pour étudier les correspondances entre type de résine et type de renfort par rapport à l'absorption acoustique | 123 |
| Figure 4. 12. ACM pour étudier les correspondances entre type de résine et type de renfort par rapport à la contrainte à la traction | 124 |
| Figure 4. 13. ACM pour étudier les correspondances entre type de résine et type de renfort par rapport à la résistance au choc..... | 124 |
| Figure 4. 14. Arbre de décision pour le critère de qualité « absorption acoustique » par rapport à la classe cible « très acceptable » | 125 |
| Figure 4. 15. Arbre de décision pour le critère de qualité « contrainte traction » par rapport à la classe cible « très acceptable » | 125 |
| Figure 4. 16. Arbre de décision pour le critère de qualité « Résistance choc » par rapport à la classe cible « très acceptable »..... | 126 |
| Figure 4. 17. Classement de performance des types de résine par rapport a la sortie« Absorption acoustique » (classe cible « Très acceptable ») | 128 |
| Figure 4. 18. Classement de performance des types de résine par rapport à la sortie « Contrainte traction » (classe cible « Très acceptable »)..... | 129 |
| Figure 4. 19. Classement de performance des types de résine par rapport à la sortie « Résistance choc » (classe cible « Acceptable ») | 129 |
| Figure 4. 20. Carte de Kohonen pour le facteur de conception « Epaisseur » par rapport au critère qualité « Contrainte traction »..... | 131 |
| Figure 4. 21. Carte de Kohonen pour le facteur de conception « Epaisseur » par rapport au critère qualité « Absorption acoustique »..... | 132 |
| Figure 4. 22. Courbe ROC pour les deux modèles arbre de décision (C4.5) et carte de Kohonen (SOM) pour le développement produit par rapport à la sortie Y_1 (Contrainte traction / performance type résine)..... | 133 |
| Figure 4. 23. Courbe ROC pour les deux modèles arbre de décision (C4.5) et carte de Kohonen (SOM) pour le développement produit par rapport a la sortie Y_4 (Absorption acoustique / performance type résine)..... | 134 |

| | |
|--|-----|
| Figure 4. 24. Classement de performance des types de renfort par rapport à la sortie « Contrainte traction » (classe cible « Très acceptable »)..... | 134 |
| Figure 4. 25. Classement de performance des types de renfort par rapport à la sortie « Absorption acoustique » (classe cible « Acceptable »)..... | 135 |
| Figure 4. 26. Courbe ROC pour les deux modèles arbre de décision (C4.5) et carte de Kohonen (SOM) pour le développement produit par rapport a la sortie Y_1 (Contrainte traction / performance type renfort)..... | 137 |
| Figure 4. 27. Courbe ROC pour les deux modèles arbre de décision (C4.5) et carte de Kohonen (SOM) pour le développement produit par rapport a la sortie Y_4 (absorption acoustique / Influence type renfort) | 137 |
| Figure 4. 28. Intervalles physique des facteurs de conception..... | 139 |
| Figure 4. 29. Pourcentage des modalités des variables nominales des facteurs de conception | 139 |
| Figure 4. 30. Pourcentage des modalités des variables nominales des critères de qualité..... | 139 |
| Figure 4. 31. Intervalle de fonctionnement des facteurs de conception pour le critère de qualité « Contrainte traction »..... | 140 |
| Figure 4. 32. Intervalle de fonctionnement des facteurs de conception pour le critère de qualité « Absorption acoustique »..... | 140 |
| Figure 4. 33. Carte de Kohonen obtenu après le tri des cellules par rapport aux facteurs de conception « Porosité » en fonction de « Type de résine » pour le critère qualité « Contrainte traction »..... | 141 |
| Figure 4. 34. Carte de Kohonen obtenu après le tri des cellules par rapport aux facteurs de conception « Porosité » en fonction de « Type de renfort » pour le critère qualité « Contrainte traction »..... | 142 |
| Figure 4. 35. Carte de Kohonen obtenu après le tri des cellules par rapport aux facteurs de conception « Porosité » en fonction de « Type de résine » pour le critère qualité « Absorption acoustique »..... | 142 |
| Figure 4. 36. Carte de Kohonen obtenu après le tri des cellules par rapport aux facteurs de conception « Porosité » en fonction de « Type de renfort » pour le critère qualité « Absorption acoustique »..... | 143 |
| Figure 4. 37. Structure hiérarchique générale proposée pour l'évaluation globale des prototypes | 146 |
| Figure 4. 38. Degrés d'acceptabilité global des prototypes liés aux critères de l'évaluation | 1 |
| Figure 4. 39. Degrés d'acceptabilité global absolu pour le prototype BC7..... | 148 |
| Figure 4. 40. Degrés d'acceptabilité global relatif pour le prototype BC7 | 148 |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 1. 1. Comparaison des méthodes d'aide à la décision | 17 |
| Tableau 1. 2. Traitement des variables qualitatifs..... | 25 |
| Tableau 2. 1. Règles floue pour produire le critère CPG | 49 |
| Tableau 2. 2. Exemple de règles de décision regroupées dans un tableau | 63 |
| Tableau 2. 3. Formalisation de la connaissance humaine | 66 |
| Tableau 2. 4. Découpage des variables en modalités uniforme | 67 |
| Tableau 2. 5. Représentation d'une connaissance humaine | 68 |
| Tableau 3. 1. Caractéristiques des fibres utilisées pour l'étude | 80 |
| Tableau 3. 2. Finesse moyenne des mélanges de fibre utilisée | 81 |
| Tableau 3. 3. Caractéristiques des aiguilles utilisées | 82 |
| Tableau 3. 4. Résultats du test de résistance au délaminage obtenu pour le mélange de fibres F5 avec les aiguilles A, B et C, selon les quatre conditions de profondeur de pénétration et de pas d'avance. | 85 |
| Tableau 3. 5. Résultats obtenus pour l'observation visuelle avec la fibre F5 | 88 |
| Tableau 3. 6. Résultats de comparaison de la pertinence des facteurs de conception entre les méthodes Sensibilité floue, PROMETHEE et Arbre de décision | 92 |
| Tableau 3. 7. Les règles de décision les plus pertinentes générées a partir de l'arbre de décision pour maximiser la variable de sortie Y_4 « observation visuelle » | 96 |
| Tableau 3. 8. Formalisation de la connaissance humaine des experts | 97 |
| Tableau 3. 9. Liste de paramètres de conception ayant une grande sensibilité..... | 100 |
| Tableau 3. 10. Caractéristiques des aiguilles A, B, C, et D | 101 |
| Tableau 3. 11. Estimation du nombre de barbes actives « r » pour les aiguilles A, B, C et D, et le type de fibre F2 « Aramid » | 105 |
| Tableau 3. 12. Nombre de fibres transférées pour les aiguilles A, B, C et D, et pour la fibre F2 Aramide pour le paramètre « 3 »..... | 106 |
| Tableau 3. 13. Valeur des coefficients de pertinence pour chaque type de saillie..... | 109 |
| Tableau 4. 1. Comparaison des résultats des méthodes sensibilité floue et arbre de décision..... pour la variable « absorption acoustique »..... | 126 |
| Tableau 4. 2. Comparaison des résultats des méthodes sensibilité floue et arbre de décision pour la variable « Contrainte traction »..... | 127 |
| Tableau 4. 3. Comparaison des résultats des méthodes sensibilité floue et arbre de décision pour la variable « Résistance choc » | 127 |
| Tableau 4. 4. Exemple d'une connaissance humaine sur les bicomposites par rapport au critère de qualité « Absorption acoustique » | 130 |
| Tableau 4. 5. Exemple d'une connaissance humaine sur les bicomposites par rapport au critère de qualité « Contrainte traction » | 131 |
| Tableau 4. 6. Résultats de l'étude de performance des fibres de renfort et de résine | 138 |

| | |
|--|-----|
| Tableau 4. 7. Intervalles de fonctionnement pertinents pour le critère de qualité « Contrainte traction » par rapport au type de résine | 143 |
| Tableau 4. 8. Intervalles de fonctionnement pertinents pour le critère de qualité « Contrainte traction » par rapport au type de renfort..... | 144 |
| Tableau 4. 9. Intervalles de fonctionnement pertinents pour le critère de qualité « Absorption acoustique » par rapport au type de résine | 144 |
| Tableau 4. 10. Intervalles de fonctionnement pertinents pour le critère de qualité « Absorption acoustique » par rapport au type de renfort..... | 145 |
| Tableau 4. 11. Degré de préférence des critères indirects..... | 147 |

Introduction générale et problématique

Dans les circonstances économiques de globalisation des échanges et de compétition internationale, la survie des entreprises aujourd'hui, nécessite qu'elles se projettent sur le marché mondial où c'est la valeur ajoutée apportée par l'innovation qui leur permet de conquérir de nouvelles parts de marchés. Pour y arriver, les entreprises sont contraintes d'améliorer leur façon de piloter la production, tant au niveau stratégique, pour s'adapter aux progrès de la technologie ou suivre les évolutions du marché, qu'au niveau opérationnel, pour réagir face aux aléas. Au niveau stratégique, ceci les conduit à modifier et adapter leurs moyens de production pour faire face à l'arrivée de nouveaux produits et de nouveaux procédés, afin d'optimiser et réduire notamment les délais de fabrication, mais aussi à innover ou repenser leur gamme de produits.

Pour faire face à ces conditions concurrentielles, il s'agit de considérer l'information sous sa forme multiple comme un élément stratégique utile pour la compétitivité des industriels, qu'elle soit issue de la connaissance humaine ou de données expérimentales. L'apparition de nouveaux moyens informatiques et de nouvelles méthodes dites « intelligentes » de traitement de données a un impact fondamental sur le potentiel d'analyse de ces informations. Parmi les nouveaux moyens informatiques, on trouve les systèmes d'aide à la conception. Ces systèmes sont utilisés quotidiennement dans les entreprises pour soutenir des décisions concernant le développement de nouveaux produits et procédés industriels. Ces systèmes permettront aux concepteurs d'extraire des informations à partir de données brutes, de documents, de connaissances professionnelles et de modèles métier, afin d'identifier et résoudre des incidents et prendre des décisions.

La plupart des outils d'aide à la conception industrielle sont basés sur l'utilisation des modèles classiques, des modèles qui ont fait leurs preuves. Par exemple l'analyse en composante principale (ACP), une des techniques qui permet de rendre opérationnelle des matrices de grandes dimensions, qui n'était praticable que sur des petits jeux de données et au prix de longs calculs. Mais ces modèles ont montré leurs limites avec l'explosion des sources d'acquisition de données, fournies par des appareils de mesure plus sophistiqués, ou aussi leurs limites pour traiter un type particulier de variables, notamment les variables qualitatives. Cela a accentué le besoin de développer de nouvelles méthodes d'analyses qui utilisent des modèles intelligents qui permettent une nouvelle approche dans l'interprétation des résultats, ainsi que la prise en compte des variables qualitatives, qui sont très courantes dans l'industrie, notamment lors de phase de développement de nouveaux produits ou procédés dont les critères de qualité sont souvent multiples et pas seulement objectifs.

Dans ce travail de recherche, nous cherchons à améliorer des outils d'aide à la conception industrielle développés dans une thèse précédente avec pour objectif notamment d'intégrer les variables qualitatives. Pour cela, nous proposons une démarche utilisant non seulement les techniques classiques d'analyse de données, mais aussi les techniques de calcul

avancé telles que la logique floue, les arbres de décision et les cartes de Kohonen. Ces modèles seront générés à partir des données expérimentales et de la connaissance humaine. Basé sur ces modèles, un système d'aide à la conception a été développé en langage UML et en programmation informatique orienté objet. Ce système a pour objet d'identifier les paramètres pertinents d'un procédé industriel ou d'un produit. Il permet également de comprendre le comportement du matériau dans le but de l'optimiser et d'avoir une vision globale des performances des produits développés selon l'ensemble des spécifications et des critères de qualité préalablement définis dans le cahier des charges fonctionnel.

Une partie de ce système a partiellement été développé au cours d'un travail de thèse de X. Deng [Deng, 2008]. Notre objectif consiste donc ici en l'amélioration fonctionnelle de ces outils, en particulier adapté à la production et l'évaluation de prototypes de produit. Dans un premier temps l'amélioration sera portée sur le traitement des variables linguistiques appelées aussi qualitatives que l'on rencontre souvent dans les projets industriels. Nous avons également traité le problème de la formalisation et de l'intégration de la connaissance humaine dans nos modèles, afin de mieux prendre en compte la complexité des produits ou procédés étudiés. La validation de notre système sera appliquée sur deux études de cas. La première concerne la compréhension d'un procédé textile de renfort par aiguilletage. La seconde s'intéresse à l'étude et au développement de matériaux biocomposites.

Le mémoire de cette thèse est composé de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous ferons un état de l'art sur les outils d'aide à la décision du point de vue de la littérature scientifique, puis nous examinerons les problématiques, les étapes et les différentes méthodes d'aide à la décision. Ensuite, en nous basant sur les méthodes identifiées, nous élaborerons les concepts d'aide à la conception de produits et procédés industriels, en présentant les différents outils utilisés, qui auront comme objectif de mesurer l'influence des facteurs de conception (matière première, paramètres du procédé, et paramètres de structure des matériaux), de déterminer l'espace de fonctionnement pertinent (les intervalles optimaux des facteurs de conception sélectionnés) relatif au procédé de fabrication, et d'évaluer la qualité globale des prototypes fabriqués en utilisant des approches d'aide à la décision multicritère. Afin de traiter les incertitudes et les imprécisions liées à la mesure des propriétés fonctionnelles, ou encore à l'expression incomplète de la connaissance humaine sur les facteurs de conception qui influent sur cette même qualité au cours de la conception des matériaux, nous utilisons non seulement les techniques classiques de traitement de données, comme l'analyse en composante principale, mais aussi les techniques de calcul avancé.

Le deuxième chapitre de cette thèse, sera consacré au développement du système d'aide à la conception. Une démarche formalisée a été proposée pour le développement du système basée sur les diagrammes UML (Unified Modelling Language) et l'architecture objet DIC (Donnée, Interface, Contrôle). Les améliorations proposées sur les outils existants, en particulier, la prise en compte des variables qualitatives et la formalisation de la connaissance

humaine, seront présentées. Le système d'aide à la conception développé comprend ainsi, une série de modèles caractérisant les relations propriété/structure/procédé, créés à partir d'une base de données expérimentales et de connaissances des experts afin de développer de nouveaux procédés et produits industriels.

Dans le troisième chapitre, nous allons appliquer le système d'aide à la conception à l'étude d'un procédé industriel. Il s'agit ici de comprendre les phénomènes de transfert de fibres dans une structure nontissée assemblée et consolidée par aiguilletage. Ainsi, nous étudions l'influence des paramètres d'aiguilletage appliqués à des structures nontissées bicouches de différentes compositions de fibres afin d'extraire des informations sur le comportement d'aiguilles en fonction des différentes natures de fibres utilisées. Cette étude nous permettra d'optimiser les facteurs pertinents du procédé en choisissant des aiguilles adaptées à la fois aux fibres, à la structure souhaitée et aux propriétés finales recherchées suivant les applications textiles et composites visées. L'application du modèle nous permettra d'étudier les relations performance renfort/paramètres procédé/structure nontissés/fibres et les relations performance procédé/paramètres et procédé/structure des nontissés/fibres. A travers cet exemple d'étude de procédé, nous mettrons en évidence l'apport de notre modèle par rapport à des méthodes classiques ou par rapport au modèle précédemment développé.

Le dernier chapitre de la thèse sera consacré à l'application du système d'aide à la conception au développement et à l'étude de produits biocomposites thermoplastiques. L'objectif est ici d'étudier les relations entre les propriétés des produits (mécanique, acoustique...) et les paramètres de structure (fibre de renfort, matrice polymère...). Cette étude s'intéresse successivement à la pertinence des facteurs de conception, puis à la définition des zones de fonctionnement pertinentes vis-à-vis du cahier des charges et enfin à l'évaluation multicritère des produits réalisés. Parmi les facteurs d'influence pris en compte dans notre étude figurent la qualité de la fibre de renfort (lin en étoupe, lin en filasse et lin en filasse affinée), divers polymères thermoplastiques bio-sourcés ou non utilisés en tant que matrice dans les composites réalisés (polypropylène, acide polylactique issu d'amidon de maïs, polymamide 11 issu d'huile de ricin), ainsi que des propriétés de structure des composites (taux volumique de fibres de renfort, porosité...). Les réponses du modèle étudié correspondent aux propriétés mécaniques (contrainte de rupture en traction, module d'élasticité en flexion, résistance au choc...) et acoustiques (absorption acoustique). Dans ce contexte de développement produit nous mettrons à nouveau en évidence l'intérêt du système d'aide à la conception proposé.

Chapitre 1 – Concepts de base

1.1. Introduction

La concurrence du marché international pousse les entreprises industrielles à adapter en permanence leurs produits et services aux attentes actuelles et futures de leurs clients pour susciter leurs confiances, en offrant, en temps voulu, des produits complexes et fiables [Fowlkes, 1998]. Elle les pousse à innover, en cherchant à satisfaire les consommateurs ayant des attentes variées, en augmentant la fiabilité et le nombre de fonctionnalités, tout en réduisant les coûts des produits développés. La concurrence étant le plus souvent imparfaite, elle les pousse à adopter diverses stratégies pour tirer au mieux leur épingle du jeu. Ce phénomène tend à se développer et à prendre une forte ampleur. Dans cette situation, les entreprises considèrent qu'il est nécessaire de trouver des stratégies efficaces pour la conception et le développement de nouveaux matériaux. La solution apportée à cette problématique s'inscrit dans le cadre de développement d'outils d'aide à la décision pour la conception de nouveaux produits industriels, qui est décrite comme une activité permettant de définir un produit conduisant à une fonctionnalité particulière et se conformant à certains critères [Gautier, 1995]. L'objectif de ces outils est de prévoir les performances du produit, et de réduire le nombre d'essais par un plan d'expériences préalablement défini, en s'appuyant sur un ensemble de décisions optimales.

La décision est un choix qui s'opère dans un domaine quel qu'il soit et dont l'objectif est d'apporter une solution à un problème. Les outils informatiques d'aide à la décision permettent au «décideur» de tester plusieurs propositions ou choix possibles pouvant résoudre le problème concerné. Ainsi, les outils d'aide à la décision à mettre en place dépendent des différents paramètres et de la nature du problème à résoudre. Initialement, ces outils ont été appliqués à la gestion financière et au commerce [Marek, 2002] [Darmendrail, 2003]. Les travaux concernés sont connus sous le nom de « Business Intelligence » (BI). En s'appuyant sur la réussite de ces travaux, les outils d'aide à la décision sont rapidement développés dans les autres domaines d'application, tels que le transport, la santé, la logistique, la sécurité et la conception de produits et de procédés.

Dans la pratique, il existe de nombreuses incertitudes et redondances dans la conception de produits en raison de la complexité du contexte. Dans cette situation, les concepteurs et les décideurs d'entreprises sont confrontés à une quantité importante de caractéristiques (facteurs de conception et critères de qualité) liées aux matériaux et aux procédés, lors de leurs décisions concernant le développement de nouveaux produits. Les données, mesurées sur ces caractéristiques, sont souvent incertaines et imprécises, et parfois incomplètes et peu nombreuses.

Bien qu'ils soient considérés comme techniques adéquates pour résoudre la conception de produits multifonctionnels dans certaines applications, les outils d'aide à la décision à multicritère, fréquemment utilisés dans la pratique, sont incapables de résoudre tous les problèmes de conception de produits. En fait, un système d'aide à la décision classique consiste à choisir la meilleure solution parmi un ensemble de candidats existants sans développer de nouvelles solutions. Pourtant, la conception d'un nouveau produit nécessite une bonne maîtrise des relations entre les combinaisons des facteurs de conception et les critères de qualité ou les propriétés fonctionnelles du produit [Brown, 2001]. La compréhension et le classement des produits existants ne sont pas suffisants. Un système d'aide à la conception devra permettre de générer des nouveaux produits par manipulation, de façon intelligente, des combinaisons des facteurs des produits existants et de leurs relations avec les besoins multiples des clients.

Dans ce chapitre, le but est de présenter le contexte général des travaux réalisés dans le cadre de ma thèse doctorale. D'abord, nous présenterons les systèmes d'aide à la décision et les méthodes fréquemment utilisées dans ce domaine. Ensuite, en nous appuyant sur les méthodes précédentes, nous montrerons les concepts d'aide à la conception de produits industriels et des procédés industriels. Enfin nous décrirons deux applications du système développé à la conception d'un procédé textile de renfort par aiguilletage et de matériaux biocomposites.

1.2. Aide à la décision

De nombreux travaux ont été développés pour résoudre les problématiques d'aide à la décision. Diverses méthodes ont été proposées pour s'adapter à des différents contextes d'aide à la décision. [Roy, 1985].

1.2.1. Les problématiques d'aide à la décision [Roy, 1985][Leclercq, 2007]

Les problématiques d'aide à la décision peuvent être synthétisées en trois catégories :

➤ Problématique α (choix)

Le problème est de choisir une seule "meilleure" action ou, tout au moins, orienter le processus vers la sélection d'un ensemble A' d'actions aussi réduit que possible tel que les actions de A' soient jugées équivalentes entre elles et meilleures que les autres du point de vue du système de valeurs (initiaux ou découlant de la recherche de compromis) ou encore difficilement comparables à cause de facteurs d'imprécision, d'incertitude ou d'indétermination.

➤ Problématique β (tri)

Cette problématique consiste à trier les actions en catégories d'après des normes ou à élaborer une procédure d'affectation à des catégories mutuellement exclusives.

L'exemple classique est celui qui conduit à préconiser l'acceptation ou le rejet d'un dossier ou encore de recommander un complément d'étude ou un réexamen après modifications.

➤ Problématique γ (rangement)

Ici le but est d'aider à ranger les actions selon un ordre de préférence décroissant ou à élaborer une procédure de classement. Chaque action reçoit un rang. Deux actions ont le même rang si rien ne permet de les départager. Les actions de même rang constituent des classes d'équivalence qu'une étude plus approfondie permettra éventuellement de décomposer plus finement. Notons que nous pouvons ou que nous devons parfois, voire souvent, se contenter d'un rangement partiel symbolisé par un graphe de préférences, à priori quelconque.

Le système d'aide à la conception que nous proposons dans ce manuscrit est développé pour traiter les trois problématiques en même temps.

1.2.2. Les étapes de l'aide à la décision

Selon Roy [Roy, 1985], La démarche scientifique d'aide à la décision se compose de quatre étapes principales comme l'indique le schéma présenté dans la Figure 1.1.

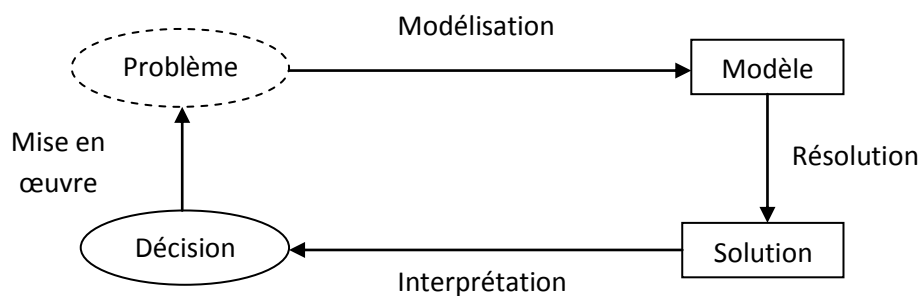


Figure 1.1. Démarche générale de l'aide à la décision

Etape 1 : modélisation

- Analyse du problème, repérage du champ de la décision, des acteurs et entités concernés, fréquence et horizon de la décision ;
- Compréhension du système de valeurs, des objectifs et préférences du décideur ;
- Choix d'une problématique décisionnelle (doit-on sélectionner une meilleure solution ; bâtir un classement sur les solutions ou affecter les solutions à des catégories prédéterminées ?) ;
- Traduction des décisions dans le langage formel choisi, définition des variables de décision ;
- Définition des paramètres, de leur domaine de variation et de leurs degrés d'incertitude ;
- Enoncé et formalisation des contraintes délimitant le domaine des décisions ;
- Formalisation du ou des critères.

Une fois qu'un modèle d'aide à la décision est créé, les décideurs peuvent l'utiliser de deux manières :

- 1) Les paramètres du modèle sont sous le contrôle partiel du décideur. Chaque paramètre représente un fragment de la décision. Les valeurs des paramètres sont déterminées de façon semi-automatique avec l'intervention du décideur.
- 2) Les paramètres du modèle sont définis automatiquement par l'environnement décisionnel. Le décideur n'a aucune intervention sur ces paramètres.

Etape 2 : Résolution

- Choix d'une démarche algorithmique exacte ou heuristique ;
- Mise en œuvre de la procédure algorithmique, recours à des logiciels spécifiques, modeleurs, solveurs, tableurs ;
- Construction d'un résultat selon la problématique choisie : sélection d'une solution optimale ou d'un sous ensemble restreint de solutions satisfaisantes, classement total ou partiel des solutions ou affectation des solutions aux catégories ;
- Analyse de sensibilité ou de robustesse du résultat en fonction des variations des paramètres.

Etape 3 : Interprétation

- Elaboration d'une recommandation sur la base des résultats précédents ;
- Présentation de la recommandation aux acteurs.

Etape 4 : Mise en œuvre

- Mise en œuvre opérationnelle de la recommandation ;
- Suivi des impacts, ajustement et actions correctives ;
- Validation et identification éventuelle d'un nouveau problème.

Guitouni [Guitouni, 1998a], [Guitouni, 1999], a proposé une démarche plus détaillée du processus d'aide à la décision, dans laquelle il considère que le processus est récursif (itératif) et non linéaire. Cette démarche se compose de cinq étapes principales :

1. La structuration de la situation (problème) de décision.
2. L'articulation et la modélisation des préférences au niveau de chaque point de vue (modélisation des préférences locales).
3. L'agrégation de ces préférences locales en vue d'établir un ou plusieurs systèmes relationnels de préférences globaux.
4. L'exploitation de cette agrégation.
5. La recommandation.

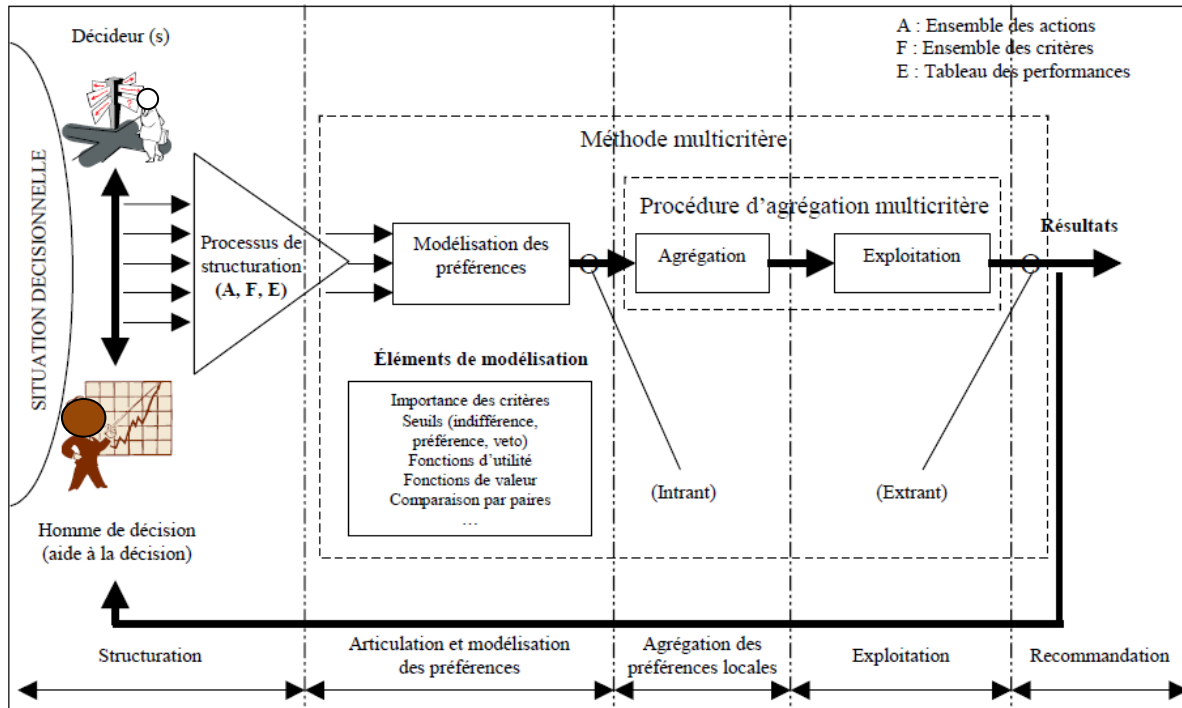


Figure 1.2. Représentation du processus détaillé d'aide à la décision [Guitouni, 1999]

Comme précisé dans la Figure 1.2, nous supposons que dans une situation décisionnelle, le décideur (la personne ayant connaissance des actions, des critères, ...) sera aidé par une personne maîtrisant le processus d'aide à la décision. Il est possible que le décideur soit lui même l'homme d'aide à la décision. Nous détaillons ci-dessous, chacune des étapes du processus d'aide à la décision multicritère.

L'agrégation des préférences locales consiste à exploiter les évaluations partielles des actions sur les différents critères afin de générer une évaluation globale.

L'exploitation consiste à exploiter les résultats obtenus à l'étape d'agrégation des préférences locales pour choisir, ranger ou trier les actions.

Selon Roy [Roy, 1985], dans certains contextes décisionnels, une modélisation élaborée des préférences du décideur est requise. Selon la manière d'agrégation des préférences du décideur, il est possible de distinguer les approches suivantes :

(1) l'approche du critère unique de synthèse évacuant l'incomparabilité d'actions. Ces approches sont exploitées dans le cas où le décideur est capable de juger toute paire d'actions {a, b} selon l'un des cas suivant : soit a est préférée à b, soit b est préférée à a, soit le décideur est indifférent entre a et b. Il n'y a donc pas d'incomparabilité entre deux actions.

(2) l'approche du sur classement de synthèse. Ces approches permettent l'incomparabilité entre actions. Certaines sont caractérisées par des structures de préférence forte, faible, indifférence, incomparabilité.

(3) l'approche du jugement local interactif. Ces approches sont caractérisées par une interaction continue entre l'homme d'étude et le décideur tout au long du processus d'aide à la décision.

1.2.3. Les étapes de la modélisation

Nous allons maintenant nous intéresser particulièrement à l'étape de la modélisation du problème de décision qui constitue le cœur du processus d'aide à la décision. Une démarche est proposée, composée de six principales étapes (Figure 1.3).

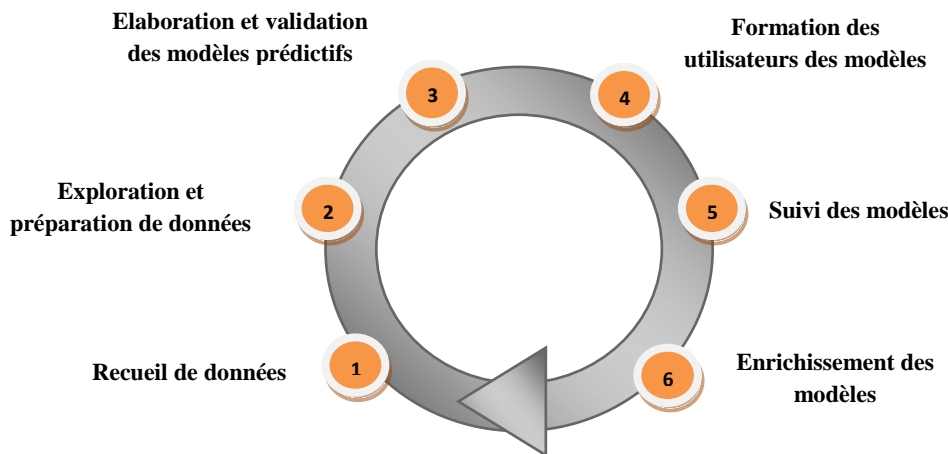


Figure 1.3. Démarche générale de la modélisation

Etape 1 : Le recueil de données

C'est au cours de cette étape qu'est constituée la base de données qui servira à la construction des modèles. Cette base d'analyse se présente le plus souvent sous forme d'une table (Oracle, MySQL, SAS, etc) ou d'un fichier (Excel, CSV, txt, etc), ayant généralement un enregistrement (une ligne) par individu statistique étudié et un champ (une colonne) par variable de cet individu.

En dehors des cas où les données sont déjà disponibles, il est nécessaire de les collecter. Les deux principales méthodologies les plus utilisées sont les sondages et les plans d'expériences.

➤ *Les sondages*

Essentiellement utilisé dans les sciences humaines, mais également dans le milieu industriel, les techniques de sondage servent à choisir dans une population les unités à interroger ou à observer. Le choix des unités se fait en général aléatoirement, mais pas nécessairement avec des probabilités égales pour toutes les unités. [Saporta, 2006]. Dans les industries, cette démarche a été utilisée pour acquérir la connaissance humaine des experts et des consommateurs par utilisation d'un groupe d'évaluateurs appropriés.

➤ *Les plans d'expériences*

Introduits au début de XXe siècle en agronomie, puis utilisés en recherche industrielle, les plans d'expériences ont pour but de provoquer l'apparition de données selon des conditions expérimentales précises. La théorie de plans d'expériences permet de minimiser le coût de recueil de données en menant les expériences les plus significatives [Saporta, 2006].

Dans notre projet de recherche, les plans d'expériences sont les principales ressources de données. Plusieurs plans ont été proposés pour les différentes applications, que ce soit pour le développement d'un nouveau procédé ou d'un nouveau produit.

Etape 2 : Exploration et préparation de données

Cette étape permet l'exploration et à la mise en forme des données, ou le contrôle de l'origine des données. Trois principales opérations sont proposées pour explorer et préparer les données :

La première opération consiste à fiabiliser, remplacer ou supprimer les données incorrectes, qu'elles aient trop de valeurs manquantes, des valeurs aberrantes, ou qu'elles aient des valeurs extrêmes s'écartant trop des valeurs habituellement admises.

La deuxième opération est la création d'indicateurs pertinents à partir des données brutes contrôlées et le cas échéant corrigées. Elle peut se faire :

- en remplaçant des grandeurs absolues par des ratios, souvent plus pertinents ;
- en calculant des évolutions temporelles de variables ;
- en effectuant des combinaisons linéaires de variables ;
- en composant des variables avec d'autre fonction ;
- en recodant certaines variables, par exemple « faible, moyen, fort » transformé en « 1, 2, 3 » ;

La troisième opération est la réduction du nombre de dimension du problème : réduction du nombre d'individus, du nombre de variables, du nombre de modalités des variables.

La réduction du nombre de variables consiste à :

- retirer les variables trop redondantes entre elles et dont la prise en compte simultanée enfreindrait l'hypothèse fréquemment recherchée et de non-colinéarité (indépendance linéaire) des variables explicatives (en régression linéaire, en analyse discriminante linéaire ou en régression logistique) ;
- retirer les variables absolument non pertinentes ou non discriminantes par rapport à l'objectif à atteindre, au phénomène à détecter ;
- fusionner les variables similaires ;
- transformer au moyen de l'analyse factorielle, les variables initiales fortement corrélées en un nombre réduit de variables moins corrélées.

Classiquement, la réduction du nombre de variables peut se faire par les techniques d'analyse factorielle, telles que l'analyse en composantes principales (ACP) (Section 1.5.2.1). Ce traitement est particulièrement utile et efficace lorsque le nombre de données d'apprentissage est limité pour la modélisation. Il permet de réduire la complexité du modèle concerné et le rendre plus interprétable.

La réduction du nombre de modalités consiste à :

- Pour les variables discrètes et qualitatives, regrouper les modalités qui sont trop nombreuses ou dans lesquelles le nombre de données est trop faible;
- Regrouper les modalités des variables discrètes et qualitatives qui ont la même signification fonctionnelle, et qui n'ont été distinguées que pour des besoins de gestion non liés à l'analyse à effectuer;
- Discrétiser certaines variables continues. Cette discrétisation peut se faire par transformation des valeurs continues en tranches de valeurs, par exemple en quartiles, ou en tranches de valeurs significatives du point de vue de l'utilisateur, ou en tranches de valeur obéissant à des règles particulières.

Etape 3 : Elaboration et validation des modèles

Cette étape constitue le noyau du processus d'aide à la décision. Elle permet le calcul des scores pour les produits concernés. Il s'agit de créer, à partir de l'échantillon d'apprentissage, un modèle prédictif, pour chaque segment obtenu dans l'étape précédente, de vérifier les résultats du modèle sur un échantillon de test distinct de l'échantillon d'apprentissage.

Pour tester la performance d'un modèle et pour comparer les modèles de la même nature, il existe des indicateurs statistiques. Comme les indicateurs statistiques de deux modèles de natures différentes (exemple : R^2 d'une analyse discriminante et R^2 d'une régression logistique) sont rarement comparables, nous confronterons les modèles, soit en évaluant leur taux d'erreur dans une matrice de confusion, soit en superposant leur courbe de lift ou leur courbe ROC (Receiver Operating Characteristic). Ces indicateurs permettront de sélectionner le meilleur modèle dans chaque famille de modèles, puis le meilleur modèle toutes familles confondues.

La courbe ROC permet de visualiser le pouvoir séparateur d'un modèle, en représentant le pourcentage d'événements bien détectés (axe Y) en fonction du pourcentage d'événements détectés à tort (axe X) lorsque l'on fait varier le seuil de séparation du score. Si cette courbe coïncide la diagonale, c'est que le modèle n'est pas plus performant qu'une notation aléatoire ; plus cette courbe est proche du coin supérieur gauche du carré, meilleur est le modèle. Nous pouvons superposer plusieurs courbes ROC pour montrer l'apport progressif de chaque variable explicative dans le modèle.

Outre les qualités de précision mathématique du modèle, d'autres critères de choix sont parfois à prendre en compte, comme la lisibilité du modèle du point de vue de l'utilisateur et sa facilité d'implémentation.

Etape 4 : Formation des utilisateurs des modèles

Pour une bonne appropriation des nouveaux systèmes décisionnels par leurs futurs utilisateurs, il est très important de prendre le temps de les leur présenter. Ceux-ci doivent connaître le but recherché, le principe des outils, leur fonctionnement (sans entrer dans les détails techniques), leurs limites, leur mode d'utilisation (en expliquant qu'il s'agit d'outils d'aide à la décision et non pas de prise automatique de décision), ce que ces outils vont leur apporter, et ce qui change dans leur travail du point de vue opérationnel et organisationnel.

Etape 5 : Suivi des modèles

Nous distinguons deux sortes de suivis des modèles :

- Le suivi ponctuel : chaque nouvelle utilisation des outils est mise en œuvre, il faut analyser les résultats obtenus.
- Le suivi continu : quand un outil est mis en place, il est utilisé en permanence et il importe de s'assurer à la fois de son bon fonctionnement et de sa bonne utilisation.

Etape 6 : Enrichissement des modèles

Une fois que nous avons mesuré les résultats de l'utilisation d'un premier modèle du système, nous sommes en mesure d'améliorer ce modèle soit, en y intégrant des variables explicatives qui n'ont pas été envisagées initialement, soit en prenant en compte de véritables retours d'expérience pour déterminer les profils à prédire.

La présente étape permet ainsi de compléter l'étape de recueil de données si celle-ci n'avait pas livré suffisamment d'éléments historiques sur la variable à prédire. Cela fait, nous pouvons reprendre les autres étapes jusqu'à l'élaboration d'un nouveau modèle encore plus performant que le premier. Ce processus itératif doit devenir permanent pour une amélioration constante des résultats.

1.2.4. Les différentes méthodes d'aide à la décision

Dans la littérature, il existe de nombreuses méthodes d'aide à la décision. Il est donc difficile de faire une étude exhaustive sur l'ensemble de ces méthodes.

Dans cette section, nous présenterons juste quelques méthodes classiques couramment utilisées par les décideurs dans les applications industrielles [Hammami, 2003]. Ces méthodes font partie de deux catégories : les méthodes de l'approche de sur classement de synthèse et les méthodes de l'approche du critère unique de synthèse.

1.2.4.1. Les méthodes de l'approche de sur classement de synthèse

Il s'agit d'une approche dans laquelle nous acceptons des situations d'incomparabilité, d'adopter un système référentiel de préférences fondé sur la notion de sur classement et dans laquelle nous explicitons une règle (test de sur classement) apportant une réponse synthétique, exhaustive et définitive au problème d'agrégation des performances.

➤ **Les méthodes PROMETHEE [Brans et Vincke, 1985]**

La méthode PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) permet de construire un préordre partiel (il peut y avoir des ex-aequo). Elle utilise, pour cela, une relation de préférence évaluée, qui donne lieu à un graphe de préférence évalué. Elle a été définie par Brans, Vincke et Mareschal et appartient à la famille des méthodes de sur classement, définie par B. Roy.

La méthode PROMETHEE se base sur une extension de la notion de critère par l'introduction d'une fonction exprimant la préférence du décideur pour une action a_i par rapport à une autre action a_k . Pour chaque critère, le décideur est appelé à choisir une des six formes de courbes représentées ci-dessous (Figure 1.4). Les paramètres relatifs à chaque courbe représentent des seuils d'indifférence et/ou de préférence.

PROMETHEE compare les actions deux à deux et mesure l'intensité de préférence $F_j(a,b)$ de l'une par rapport à l'autre sur chaque critère j au moyen d'une fonction $F_j(d)$. d représente la différence des évaluations $g(a)-g(b)$ sur le critère. Les formes de fonction de préférence les plus utilisées sont données dans la Figure 1.4.

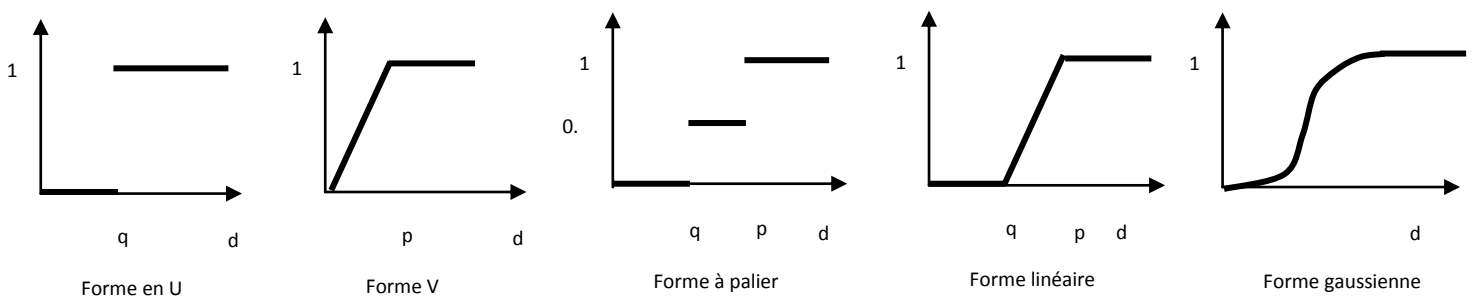


Figure 1.4. Différents types de critères [Vincke 1989]

La Méthode PROMETHEE fournit un pré-ordre total et se présente comme suit (Figure 1.5) :

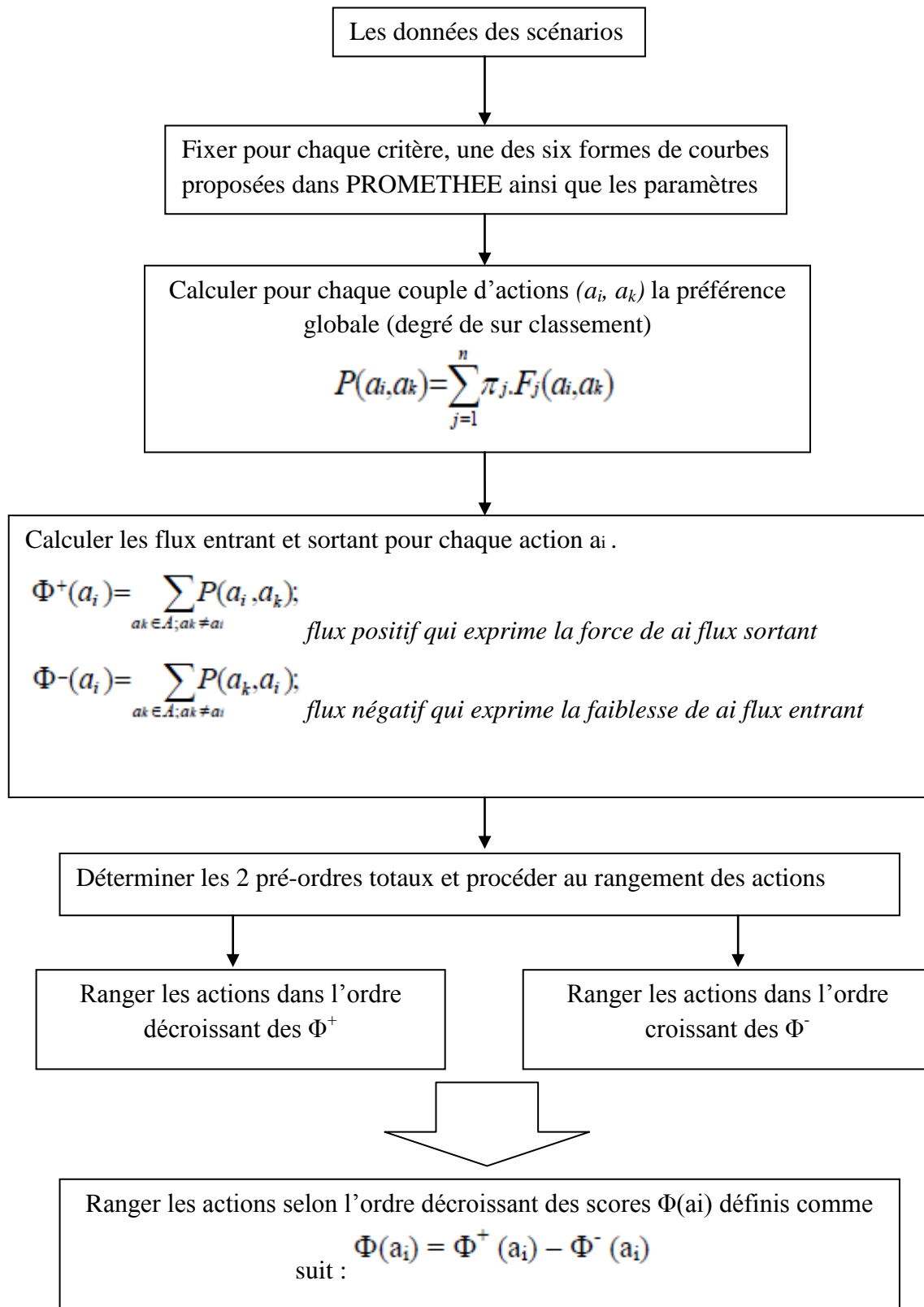


Figure 1.5. Les étapes de la méthode de classement PROMETHEE

La méthode PROMETHEE présente les avantages suivants :

- Un maximum de liberté sur les critères à utiliser ;
- Le nombre de critères peut varier par simple ajout ou suppression ;
- Les critères à maximiser et à minimiser interviennent simultanément ;
- L'utilisation de fonctions de préférences permet de quantifier les critères et de comparer les solutions.

Néanmoins des inconvénients de la méthode PROMETHEE se présentent. En particulier, la charge de calcul pour obtenir les flux est souvent trop lourde, notamment dans la conception industrielle qui demande une grande maîtrise du domaine par les experts, mais aussi le fait de prendre des seuils d'indifférence et de préférence constants peut être considéré comme une restriction.

➤ **La méthode Electre (ELiminations Et Choix Traduisant la Réalité) [Roy 1968]**

Cette méthode est assez proche de la méthode PROMETHEE. Elle permet de choisir la meilleure action suivant un groupe de critères. Elle a été définie par B. Roy en 1968 [Vincke, 1989] [Maystre, 1994]. Celle-ci demande peu d'information pour pouvoir être implémentée. De plus, ces informations sont facilement accessibles au décideur (car il est plus facile de comparer deux actions que de donner une évaluation précise de leurs performances). Elle fournit donc des résultats solides mais pauvres. Plusieurs versions de la méthode Electre existent : Electre I, Electre II, Electre III, Electre Is, Electre IV.

L'inconvénient de cette méthode réside dans la définition de paramètres nombreux et l'obligation de réaliser des analyses de sensibilité et de robustesse, parfois longues.

1.2.4.2. Méthodes de l'approche du critère unique de synthèse

Il s'agit d'une approche dont le principe est d'évacuer toute situation d'incomparabilité et d'explicitement une règle de (fonction d'agrégation) apportant une réponse synthétique, exhaustive et définitive au problème d'agrégation des performances [Maystre, 1994].

➤ **La méthode EVAMIX [Voogd, 1983]**

La méthode EVAMIX traite les évaluations ordinales et cardinales. Afin d'évaluer une action par rapport à une autre, nous calculons deux indices de dominance : le premier pour les évaluations ordinales et le second pour les évaluations cardinales. Ces deux indices sont par la suite normalisés puis combinés pour donner une mesure globale de la dominance. Enfin, un score global par action est calculé, ce qui permettra de classer les actions.

➤ **La méthode AHP : Analytic Hierarchy Process [Saaty, 1980]**

La méthode AHP consiste à représenter un problème de décision par une structure hiérarchique reflétant les interactions entre les divers éléments du problème, à procéder

ensuite à des comparaisons par paires des éléments de la hiérarchie, et enfin à déterminer les priorités des actions.

Étape 1 : Décomposer le problème en une hiérarchie d'éléments inter-reliés.

Au sommet de la hiérarchie, nous trouvons l'objectif, et dans les niveaux inférieurs, les éléments contribuant à atteindre cet objectif. Le dernier niveau est celui des actions (Figure 1.6).

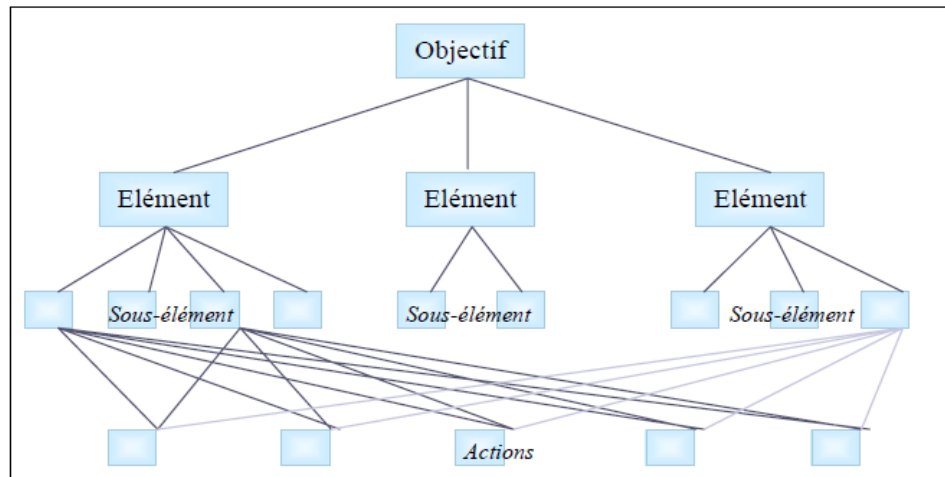


Figure 1.6. Structure hiérarchique d'un problème selon la méthode AHP

Étape 2 : Procéder à des comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur. Cette étape permet de construire des matrices de comparaisons. Les valeurs de ces matrices sont obtenues par la transformation des jugements en valeurs numériques selon l'échelle de Saaty (Echelle de comparaisons binaires), tout en respectant le principe de réciprocity :

$$P_c(E_A, E_B) = \frac{1}{P_c(E_B, E_A)} \quad (1.1)$$

Étape 3 : Déterminer l'importance relative des éléments en calculant les vecteurs propres correspondant aux valeurs propres maximales des matrices de comparaisons.

Étape 4 : Vérifier la cohérence des jugements.

- Nous calculons d'abord, l'indice de cohérence IC.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1.2)$$

Où : λ_{max} est la valeur propre maximale correspondant à la matrice des comparaisons par paires et n est le nombre d'éléments comparés.

- Nous calculons le ratio de cohérence (RC) défini par :

$$RC = 100 \cdot \frac{IC}{ACI} \quad (1.3)$$

Où ACI est l'indice de cohérence moyen obtenu en générant aléatoirement des matrices de jugement de même taille.

Une valeur de RC inférieure à 10% est généralement acceptable, sinon, les comparaisons par paires doivent être révisées pour réduire les incohérences.

Étape 5 : Établir la performance relative de chacune des actions.

$$P_k(e_i^k) = \sum_{j=1}^{n_{k-1}} P_{k-1}(e_i^{k-1}) \cdot P_k(e_i^k / e_j^{k-1}), \quad \text{avec} \quad \sum_{j=1}^{n_k} P_k(e_i^k) = 1 \quad (1.4)$$

Où n_{k-1} est le nombre d'éléments du niveau hiérarchique $k-1$, et $P_k(e_i^k)$ est la priorité accordée à l'élément e_i^k au niveau hiérarchique k .

Cette méthode possède l'avantage d'être la seule méthode permettant de vérifier la cohérence des relations d'importance entre critères, dont le nombre de critères et sous-critères n'est pas limité. Néanmoins, son inconvénient réside principalement dans le fait que le nombre des comparaisons augmente plus rapidement que le nombre des critères.

1.2.4.3. Comparaison des méthodes

Le choix de la méthode d'aide à la décision n'est pas facile [Bouyssou, 1984] car il n'existe pas une méthodologie bien détaillée pour faire ce choix. En effet, Guitouni et Martel [Guitouni, 1998b] remarquent que la plupart des analystes et chercheurs sont incapables de justifier le choix d'une méthode. C'est pourquoi, par familiarité ou affinité avec une méthode donnée, nous justifions le choix du décideur. À la lumière de ce qui précède, nous allons ressortir les avantages, les inconvénients et les particularités de chaque méthode afin d'éclaircir l'importance de développer de nouvelles méthodes d'aide à la décision (Tableau 1.1).

Tableau 1. 1. Comparaison des méthodes d'aide à la décision

| Critère de comparaison entre méthodes | PROMETHEE | Electre | EVAMIX | AHP |
|--|-----------|---------|--------|-----|
| Analyse de décision d'offres la plus proche à approche humaine-raisonnable | +++ (*) | ++ | + | +++ |
| Bien structurée et facile de suivre | ++ | ++ | + | ++ |
| Simplicité | + | + | + | ++ |
| Traitement de tout nombre de projets | ++ | + | + | ++ |
| Traitement de tout type de données (qualitative/quantitative) | ++ | + | + | ++ |

(*)Le nombre des symboles + représente le niveau de satisfaction de la méthode au critère

Pour choisir maintenant la bonne méthode, il faut alors se poser les bonnes questions, voici quelques exemples.

- Quel est le matériel de calcul dont on dispose ? S'il ne s'agit que d'une machine à calculer, une feuille de papier et un crayon, mieux vaut s'orienter vers des méthodes relativement simples.
- Quelles sont les informations dont on dispose au terme de l'étude préliminaire à la mise en œuvre proprement dite d'une méthode ? La forme du système relationnel de préférences du décideur peut déjà permettre d'éliminer certaines méthodes. De même, l'information intercritère (poids) sélectionnera, du moins grossièrement, les méthodes adéquates.
- Quelle est la problématique de la question ?
- De façon plus culturelle, quelles sont les affinités du décideur vis-à-vis des différentes méthodes ? Pour autant que le décideur ait des notions de base et par défaut, de la part de l'homme d'étude, de convaincre le décideur de changer de méthode, cette dernière peut être fixée dès le départ.

1.3. Développement d'outils d'aide à la conception

1.3.1. Conception de produits industriels et de matériaux multifonctionnels

Il existe plusieurs définitions concernant la conception de nouveaux produits industriels et de matériaux multifonctionnels. D'une manière générale, la conception est décrite comme « une activité permettant de définir un produit conduisant à une fonctionnalité particulière et se conformant à certains critères » [Gautier, 1995]. Nous avons constaté que la conception est complexe, instable, et met en œuvre un grand nombre de techniques dans le but d'atteindre les objectifs de qualité prédéfinie.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons essentiellement à la conception des matériaux fibreux/composites multifonctionnels. En raison du bon rapport performance/prix et de leur adaptabilité, la quantité de produits finis utilisant les matériaux fibreux/composites multifonctionnels augmente de façon significative depuis les dernières décennies.

La conception de ces matériaux multifonctionnels est très complexe d'abord parce qu'ils sont caractérisés par un ensemble de spécifications et de critères de qualité variés incluant notamment [Vroman, 2007]:

- Les propriétés fonctionnelles (propriétés mécaniques, propriétés hydrauliques, les propriétés physico-chimiques, barrières ou propriétés d'isolation, etc.) ;
- Les propriétés structurelles (poids, épaisseur, densité, etc.) ;
- Les propriétés sensorielles et d'usage (ergonomie, toucher, aspect visuel, sensation au porter, etc.) ;
- Les propriétés spéciales (introduction de capteurs, actionneurs, d'éléments pour le transport d'énergie ou d'informations, etc.) ;

- Les contraintes économiques (coût des matières premières, coût de production, chaîne d'approvisionnement, réseau de distribution, marketing de produits techniques, etc.) ;
- Les contraintes écologiques (capacité de recyclage, biodégradabilité, impact environnemental, etc.) ;
- Les contraintes sociétales et politiques (type de main d'œuvre utilisée, accord commercial, etc.).

Afin de concevoir des matériaux complexes satisfaisant à de multiples critères de qualité que nous rencontrerons dans nos cas d'étude, nous avons utilisé un processus général de conception, adapté à la conception des produits multicritères [Deng, 2008] (Figure 1.7). Il a été inspiré par «la conception de techniques d'ingénierie robuste» et «Six Sigma» (DFSS) [Demonsant, 2002] [Allen, 2006]. Celui-ci peut répondre aux spécifications fonctionnelles du client en intégrant les connaissances d'experts sur les produits et procédés de fabrication. Ce processus comprend cinq étapes: Définir, Mesurer, Analyser, Améliorer et contrôler.

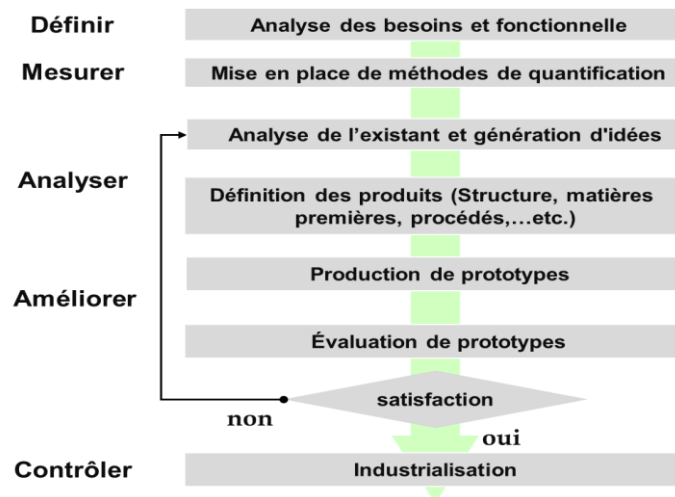


Figure 1.7. Démarche générale pour la conception des matériaux fibreux multifonctionnels

1.3.2. Outils d'aide à la conception

Un système d'aide à la conception est un ensemble d'outils d'aide à la décision qui sont destinés à faciliter et à aider les tâches des concepteurs [Vallin, 2002]. Dans la littérature, de nombreux outils d'aide à la décision ont été développés pour la conception industrielle [Merlo, 2008], [Yannou, 2002], [Limayem, 1999], mais généralement ces outils se concentrent sur les relations entre les propriétés visées du produit et les paramètres du procédé [Vroman, 2008b]. Différent des approches classiques d'aide à la décision visant à trouver la meilleure solution parmi un ensemble des candidats préalablement définis. Un outil d'aide à la conception industrielle devra permettre de générer, de façon intelligente, de nouvelles solutions par manipulation des combinaisons des facteurs de conception et des relations de ceux-ci avec les attentes du client. La conception d'un produit ou matériaux à plus forte valeur ajoutée nécessite de mieux comprendre son comportement relatif à son environnement

fonctionnel. Ceci nous amène naturellement à devoir davantage caractériser la structure même du matériau ainsi que ses propriétés physico-chimiques. Cela correspond donc désormais à l'étude des relations propriétés/structure ou des relations propriété/structure/procédé. Ainsi il est nécessaire de proposer de nouvelles méthodes d'aide à la décision pour la conception de nouveaux procédés et matériaux multifonctionnel. La Figure 1.8 présente la démarche de décision architecturale pour l'aide à la conception, pour ce travail nous parlons des outils d'aide à la conception industrielle pour le développement des nouveaux procédés et produits.

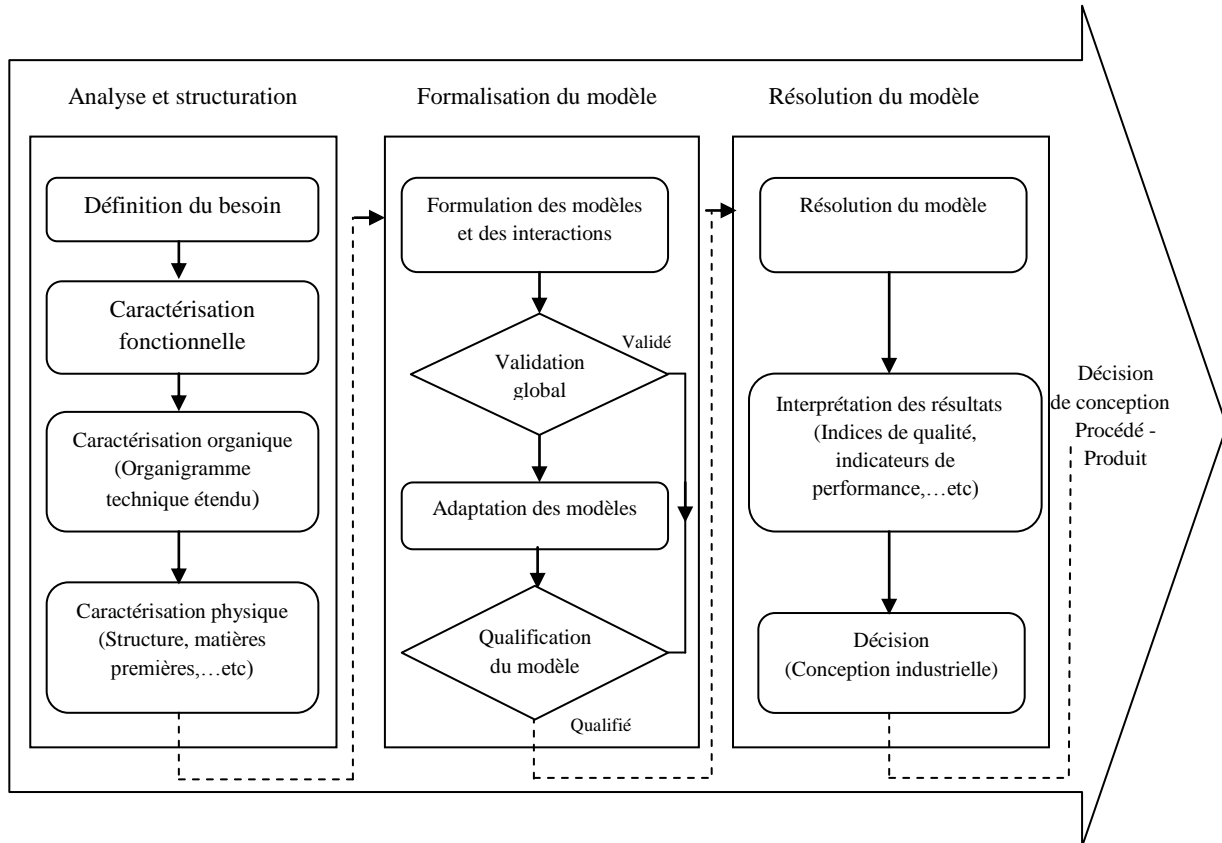


Figure 1.8. Démarche générale pour l'aide à la conception

Dans le cadre de cette thèse, nous considérons qu'un produit industriel est caractérisé par deux espaces : facteurs de conception et critères de qualité. Nous parlerons de critère de qualité lorsque nous désignons une propriété fonctionnelle (propriété acoustique, propriété de filtration, propriété mécanique, etc), une propriété structurelle à atteindre (épaisseur, porosité, etc), une propriété sensorielle (vision, toucher, etc), contraintes économique (coût de production, coût de la matière première, etc), contrainte écologique (recyclabilité, hygiène, etc) ou contrainte sociétale, et les facteurs de conceptions représentent les paramètres dont le concepteur fait varier pour accomplir un critère de qualités, nous utiliserons facteur de conception pour désigner une matière première (type de fibre), un paramètre de structure (épaisseur, densité, perméabilité à l'air, etc), un paramètre de procédé (type d'aiguilles, fréquence d'aiguilletage, etc), ou l'environnement de la production [Vroman, 2008a].

Une approche a été proposée [Deng, 2008], qui consiste à développer un nouveau modèle basé directement sur les relations entre les critères de qualité, considéré comme variables de sortie, et les facteurs de conception, considéré comme variables d'entrée. Ce

modèle, illustré dans la Figure 1.9, représente les relations entre, d'une part, les paramètres sur lesquels le concepteur peut agir et, d'autre part, les propriétés visées et les contraintes spécifiques. Les variables qui caractérisent la structure du matériau Figurent soit en entrée comme facteurs de conception à ajustement libre (ex. : densité de fibres), soit en sortie comme contraintes ou caractéristiques visée (ex. : dimensionnement imposé).

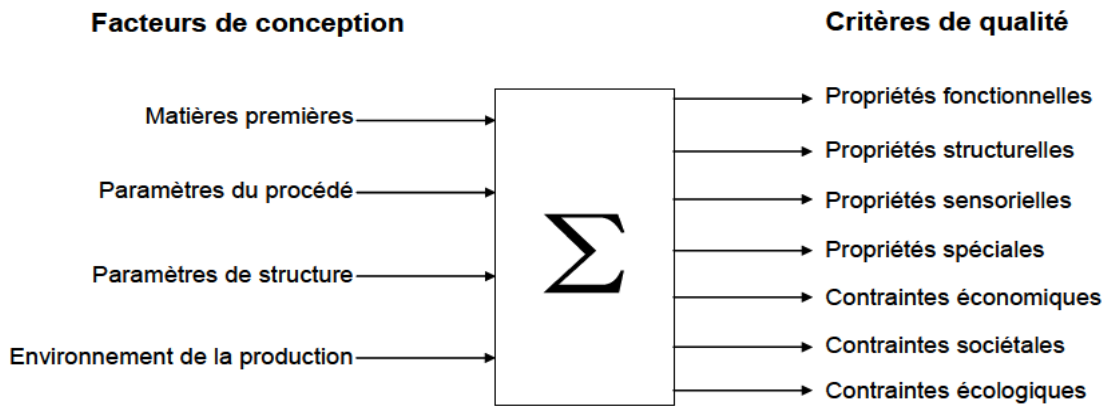


Figure 1.9. Modèle des relations entre les critères de qualité et les facteurs de conception

1.3.3. Les outils du système d'aide à la conception

Le système d'aide à la conception précédent se compose de trois outils de calcul suivants :

- Outil 1 : Sélection et analyse des facteurs de conception
- Outil 2 : Détermination des espaces de fonctionnement
- Outil 3 : Évaluation globale des prototypes

Ces outils vont principalement intervenir dans les deux phases de conception de nouveau matériaux, c'est-à-dire dans la production et évaluation des prototypes.

1.3.3.1. Outil 1 : Sélection et analyse des facteurs de conception pertinents

Dans un système industriel, il existe une quantité importante de variables d'entrée et de sortie. En même temps, le nombre de données expérimentales est très limité en raison notamment de la non disponibilité des outils de production et des coûts relatifs aux essais. Une modélisation utilisant la totalité de ces variables d'entrée et de sortie est un problème souvent très complexe, et souvent nous pouvons inclure des éléments de données qui ne sont pas intuitivement évident dès le départ. Ainsi les résultats correspondants sont alors difficiles à interpréter. Par conséquent, la sélection de variables pertinentes est une étape très importante dans la modélisation avant toute investigation ou analyse des données.

L'objectif principal du premier outil, consiste alors à identifier les variables d'entrée pertinentes par rapport à une variable de sortie. La sélection de variables pertinentes dans un modèle est donc une problématique importante qui a fait l'objet de nombreuses recherches

[Leary, 1998]. Les méthodes existantes sont généralement réparties en deux grandes catégories : l'extraction des variables et la sélection des variables.

Dans la première catégorie, toutes les caractéristiques initiales sont projetées sur un sous espace multidimensionnel par minimisation d'un critère représentant la perte d'information. Cette catégorie comprend notamment l'Analyse en Composantes Principales (ACP) [Regner, 2008], et la régression partielle des moindres carrés « Partiel Least Square, PLS » [Yeniay, 2002], qui effectuent une transformation linéaire d'un vecteur de caractéristiques depuis l'espace original vers le sous espace.

Dans la deuxième catégorie, les variables pertinentes sont directement sélectionnées à partir des variables initiales. Un algorithme de sélection est souvent conçu pour maximiser les distances inter-classes et minimiser les distances intra-classes. Dans cette catégorie, les techniques de recherche les plus utilisées sont la Recherche Séquentielle en Avant (Forward Search, FS) et la Recherche Séquentielle en Arrière (Backward Search, BS) qui permettent de rajouter ou d'éliminer itérativement des variables [Blum, 1997].

En générale avec ces méthodes, les variables extraites se trouvent souvent dans un espace réduit, et il est donc difficile de déterminer les correspondances de l'espace original à partir des valeurs de l'espace réduit. De plus, les méthodes basées sur une dépendance linéaire sont incapables de tenir compte des relations non-linéaires entre l'espace d'entrée et de sortie. Ces méthodes fonctionnent mieux lorsque le nombre de données mesurées sur les deux espaces d'entrée et de sortie est conséquent. Cela n'est généralement pas le cas dans le développement de procédé et la conception des produits. Ainsi ces méthodes ne sont pas efficaces pour résoudre les problèmes industriels dans lesquels le nombre de données d'apprentissage est faible. Pour pallier à cet inconvénient, une nouvelle méthode de sélection basée sur la sensibilité des données a été développée [Deng, 2006], afin d'évaluer le degré d'influence des différents facteurs de conception sur chacun des critères de qualité.

La méthode que nous proposons permet de compenser le manque de données provenant d'un nombre d'essais volontairement limité par l'utilisation de la connaissance humaine sur les relations entre facteurs de conception présélectionnés et critères de qualité désirés. Le principe est notamment de mesurer la conformité entre cette base de connaissance humaine et les résultats de l'analyse statistique des données disponibles [Deng, 2007b]. L'expression de cette base de connaissance et l'estimation de cette conformité est réalisée à l'aide de systèmes flous.

1.3.3.2. Outil 2 : Détermination de l'espace de fonctionnement

Le deuxième outil concerne la détermination de l'espace de fonctionnement. L'objectif ici est de déterminer les conditions de fabrication qui répondent aux spécifications. Une procédure spéciale est également été proposée afin de guider de nouveaux essais pour l'optimisation des produits [Laouisset, 2011a] [Deng, 2008b]. L'outil proposé permet de partitionner, de façon quasi-optimale, l'espace des facteurs de conception (en particulier les paramètres du procédé) et d'extraire des règles floues caractérisant les relations entre les

facteurs de conception et les critères de qualité. Elle conduira d'une part, à déterminer les futures zones d'investigation pour la réalisation de nouveaux prototypes (particulièrement utile dans le cas où les critères de qualité ne sont pas remplis) et d'autre part, à définir une plage de fonctionnement de fabrication qui répond au cahier des charges. En utilisant cet outil, nous pouvons réaliser une série de prototypes représentatifs permettant une convergence rapide vers les critères de qualité prédéfinis tout en minimisant le nombre d'essais.

1.3.3.3. Outil 3 : Evaluation multicritère et hiérarchique

Le troisième outil correspond à l'évaluation multicritère et hiérarchique des prototypes. Le but est d'estimer le niveau de préférence global en fonction de critères de qualité préalablement définis. Cette évaluation comporte généralement plusieurs critères quantitatifs et qualitatifs. C'est-à-dire qu'elles comprennent des mesures physiques et des évaluations humaines (experts du procédé et du produit) qui sont souvent liés à la perception de la qualité.

Il existe souvent des incertitudes et des imprécisions lors de l'évaluation des prototypes déjà fabriqués, car une quantité d'informations linguistiques est utilisée dans ce processus. Ces informations comprennent les poids de pondération des critères d'évaluation, les poids de pondération des évaluateurs, ainsi que leurs jugements par rapport aux prototypes. Les approches mathématiques classiques ne sont pas disponibles pour traiter ces descripteurs linguistiques. Dans ce contexte, nous proposons une technique d'aide à la décision multicritère utilisant la logique floue, particulièrement utile à la combinaison d'évaluation linguistique et de mesures physiques pour obtenir des informations sur les performances du produit et de connaître l'impact de chaque critère de qualité sur la performance globale du produit dans le but d'étudier les améliorations techniques [Laouisset, 2010] [Lu, 2008].

Tous les outils décrits ci-dessus sont basés sur le principe de calcul avancé, tel que la logique floue, arbre de décision, carte de Kohonen, etc. Cela permet l'intégration de la connaissance humaine, la prise en compte de la complexité du modèle, la compensation du manque et de l'incertitude des données. Ces outils vont être validés et éprouvés sur plusieurs contextes expérimentaux : composites, filtration, acoustique, biomatériaux, etc. Ces outils ont été développés pour compléter et enrichir l'analyse avec les autres méthodes classiques : ACP, Variance, etc.

Le sujet de la thèse tire ses origines d'un projet visant à étudier l'influence des paramètres de structure des non-tissés sur les propriétés fonctionnelles, où une partie de cette étude a été déjà réalisé au cours d'une thèse [Deng, 2008]. Notre actuel objectif consiste à compléter cette étude et résoudre les différents problèmes rencontrés dans les travaux précédents, en particulier le traitement des variables linguistiques appelé aussi qualitative rencontré fréquemment dans les applications industrielles. Nous traitons aussi le problème de la prise en compte de la connaissance humaine. L'ensemble des outils d'aide à la conception a été regroupé sur une plateforme logicielle avec des interfaces conviviales d'utilisateurs afin de faciliter la tâche des concepteurs.

1.4. Problèmes rencontrés dans le développement d'outils d'aide à la conception

Plusieurs problèmes ont été rencontrés lors du développement des outils d'aide à la conception de produits industriels. Ces problèmes comprennent essentiellement le traitement de variables qualitatives et l'intégration de la connaissance humaine.

1.4.1. Problème de traitement des variables qualitatives

Dans la conception de procédés et de produits industriels, nous avons pratiquement toujours recours à l'utilisation des grandeurs à la fois qualitatives (ordinales ou nominales) et quantitatives (discrètes ou continues). Pour traiter ce mélange de données, les ingénieurs praticiens ont à leur disposition de très peu de méthodes performantes, éprouvées et implantées dans les outils d'aides à la conception. Dans certaines approches de modélisation, les variables qualitatives sont formalisées par un codage numérique. Par exemple, pour la variable « *type de fibre* », « 1 » désigne le polyester, « 2 » le lin et « 3 » la paille. Mais dans la réalité ces nombres ne sont pas significatifs au niveau d'ordre et ne peuvent pas faire l'objet d'opérations arithmétiques comme par exemple le calcul d'une moyenne. En tout cas, les types de variables devront être considérés lors de la modélisation des relations complexes pour la conception de produits. La description des types de variables est illustrée ci-dessous.

➤ Type de variables

Une variable est une caractéristique étudiée pour une population donnée, qui peut prendre plusieurs valeurs. [Saporta, 2006]. Nous distinguons deux types de variables (Figure 1.11) :

a. Les variables qualitatives: sont des variables qui expriment des qualités et qui se présentent en modalités. Elles permettent de faire des regroupements par catégorisation ou par classement. [Saporta, 2006]. Pour les variables qualitatives, il y a deux différents types :

Les variables qualitatives nominales: sont des variables dont les valeurs ou modalités comprennent des mots ou symboles sans aucun ordre précis. Quelques exemples de ce type de variables sont le type de fibre, le type d'aiguilles, la couleur, etc. [Saporta, 2006].

Les variables qualitatives ordinales: sont des variables dont les valeurs peuvent être ordonnées. Un exemple de ce type est le degré de satisfaction des clients par rapport à un produit. Les différentes modalités peuvent être : très satisfait, satisfait, insatisfait, très insatisfait. Les variables qualitatives ordinales sont très souvent des degrés de satisfaction, d'approbation, etc. [Saporta, 2006]

b. Les variables quantitatives: sont quant à elles des variables mesurables, représentées par des quantités numériques. Elles s'expriment en valeurs et permettent de faire des synthèses statistiques : moyenne, minimum, maximum, écart type, etc. [Saporta, 2006].

Pour les variables quantitatives, nous avons aussi deux types différents :

Les variables quantitatives discrètes: comprennent des valeurs entières que l'on peut énumérer. Par exemple, le nombre de prototypes réalisés.

Les variables quantitatives continues: comprennent des valeurs réelles dont l'énumération n'est pas significative.

Le diagramme suivant résume les différents types de variables (Figure 1.10) :

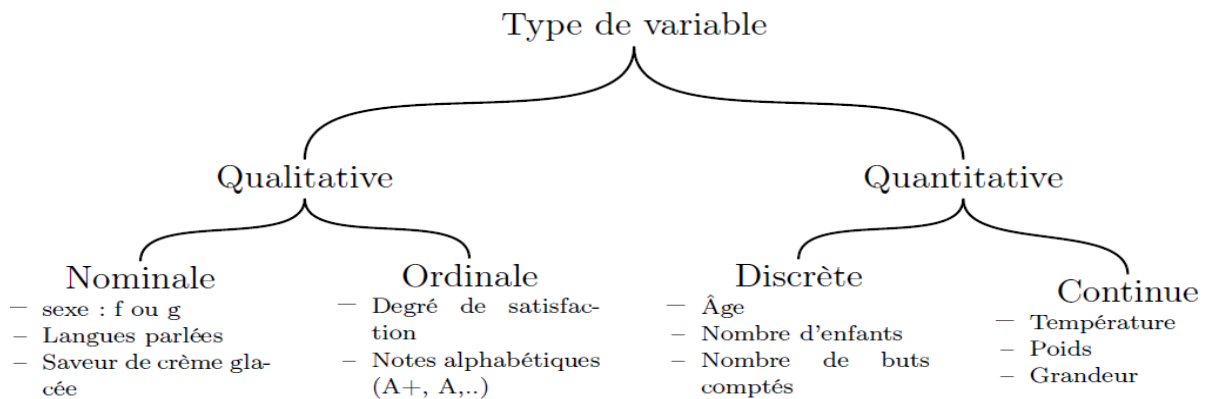


Figure 1.10. Types de variable

En général, une méthode statistique s'adapte à des données quantitatives mais moins efficace pour traiter les variables qualitatives, surtout les variables nominales. Néanmoins certaines opérations classiques permettent de passer d'un type à un autre, comme indiqué dans le tableau suivant (Tableau 1.2) :

Tableau 1. 2. Traitement des variables qualitatifs

| Type de données en entrée | Type de données en sortie | Opération | Principe |
|---------------------------|---------------------------|---|--|
| Continu | discret | discrétisation | Découpage de l'ensemble des valeurs en tranches |
| Discret ou qualitatif | continu | ACM (Analyse de Correspondance Multiple), K-Means | Fournit des facteurs continus à partir des données en entrée |

L'avantage de L'ACM [Baccini, 2010] est de permettre de traiter simultanément les variables quantitative (que l'on découpe en classes) et qualitatives, en appliquant les méthodes précédentes aux facteurs en sortie de l'ACM.

Une autre approche consiste à se tourner vers des variantes des K-Means, comme les k-modes [Huang, 1998] qui s'appliquent aux données qualitatives, et les k-prototypes [Huang, 1997] qui combinent les k-means et les k-modes et s'appliquent aux données mixtes.

1.4.2. Problème d'intégration de la connaissance humaine

La prise en compte de la connaissance humaine, permet de déduire un ensemble de propriétés psycho-cognitives décisives propres qui ont la représentation mentale comme fondement commun [Linard, 1990]. Certes l'intelligence humaine étant des systèmes auto-référents, elles sont soumises à leurs lois de limitation, elles ne peuvent traduire le réel que de façon approximative et incomplète [Hofstadter, 1985].

La Figure 1.11 montre la répartition du temps passé par les experts pour extraire une connaissance. Chaque étape donne souvent lieu à de nombreuses itérations avec les étapes précédentes.



Figure 1.11. Étapes clés et répartition du temps passé avec les experts métier [Piton, 2011]

Mais dans la pratique, nous rencontrons souvent des problèmes d'incertitude et d'imprécision dans la connaissance humaine. En aucun cas, nous ne pouvons pas obtenir, à partir de la connaissance humaine, autant de précision que les données expérimentales. Une connaissance humaine comprend également une ambiguïté importante car les différents experts professionnels ayant des expériences variées, peuvent interpréter un phénomène physique de différentes manières. Malgré les problèmes précédents, de nombreux travaux de recherche ont été menés pour traiter la connaissance humaine, car celle-ci constitue une complémentarité par rapport aux données mesurées dans des expériences physiques.

Ainsi, et afin d'intégrer, de façon efficace, la connaissance humaine sur les produits et les procédés dans la modélisation, nous avons défini un critère sur cette connaissance, appelé critère de confiance issue d'un expert ou d'un groupe d'experts, pour que nous puissions combiner cette connaissance avec les données expérimentales. Le critère de confiance permet de transmettre l'information qualitative et incomplète sur les relations entre les critères de qualité et les facteurs de conception en valeurs numériques. De cette manière, le système combiné de ces deux sources d'information est capable de prendre en compte à la fois les données expérimentales sur le produit et le procédé, et la connaissance humaine fournie par les experts.

1.5. Techniques de calcul utilisées pour développement des outils d'aide à la conception

Dans ce qui suit, nous présentons les techniques que nous utilisons pour résoudre les problèmes rencontrés dans le développement des outils d'aide à la conception (traitements de variables nominales et de connaissances humaines). Pour chaque technique présentée, nous décrivons les notions de base et les méthodes de calcul utilisées. Ces techniques comprennent la logique floue, l'analyse factorielle, les arbres de décision et les cartes de Kohonen. Les applications spécifiques de ces techniques de calcul à la conception industrielle sont présentées dans les chapitres suivants.

1.5.1. La logique floue

La logique floue peut être vue comme étant une partie des techniques dédiées à l'intelligence artificielle en général. Elle est considérée comme une technique pour répondre au besoin de représentation des connaissances imprécises, exprimées en langage naturel. Cette théorie a été premièrement développée par L.A.ZADEH en 1965 [Bouchon-Meunier, 1995].

La logique floue est souvent utilisée dans les problèmes d'aide à la décision, notamment dans les applications industrielles avec un environnement incertain [Mastorocostas, 2000], [Na, 1998], [Ruan, 1998], [Kim, 1997]. Cette technique permet en effet de traiter des informations imprécises, incertaines ou incomplètes. De même, elle est capable de fournir des solutions rapides, robustes, interprétables et plus significatives.

1.5.1.1. Notion de base

Dans la théorie de logique classique ou booléenne, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble. Cela veut dire que les frontières des ensembles sont bien définies. Mais dans la nature, il est rare que un phénomène (ex. couleur, climat tempéré) ou un concept (ex. jeunesse, grande taille, confort) soit précisément défini.

Ainsi, la théorie de la logique floue repose sur la notion d'appartenance partielle. Les frontières des ensembles flous peuvent être plus ambiguës et imprécises.

1.5.1.2. Fonction d'appartenances

Un ensemble flou A est défini sur un univers de référence X par sa fonction d'appartenance μ_A qui associe à chaque élément $x \in X$ une valeur $\mu_A(x)$ dans l'intervalle $[0,1]$.

Si $\mu_A(x) = 1$, alors l'élément x appartient tout à fait à A ;

Si $\mu_A(x) = 0$, alors l'élément x n'appartient pas du tout à A ;

Dans les cas intermédiaires, plus $\mu_A(x)$ est proche de 1, plus l'élément x appartient à A .

Un ensemble flou discret ou continu est souvent caractérisé de façon graphique par une fonction d'appartenance appliquée sur le domaine d'une variable numérique. De cette manière, les ensembles flous sont capables de donner une représentation à des valeurs subjectives [Neto, 1989].

Exemple : Supposons que nous voulions définir l'ensemble des personnes de « *taille moyenne* ». En logique classique, nous conviendrions par exemple que les personnes de taille moyenne sont celles dont la taille est comprise entre 1,60 m et 1,80 m. La fonction caractéristique de l'ensemble (Figure 1.12 a) donne « 0 » pour les tailles hors de l'intervalle [1,60 m ; 1,80 m] et « 1 » dans cet intervalle. L'ensemble flou des personnes de « *taille moyenne* » sera défini par une « fonction d'appartenance » qui diffère d'une fonction caractéristique par le fait qu'elle peut prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle [0, 1]. A chaque taille possible x correspondra un « degré d'appartenance » $\mu_A(x)$ à l'ensemble flou des « *tailles moyennes* » A (Figure 1.12 b). La fonction d'appartenance établit un lien entre une valeur numérique et un concept linguistique (ex. « *tailles moyennes* »).

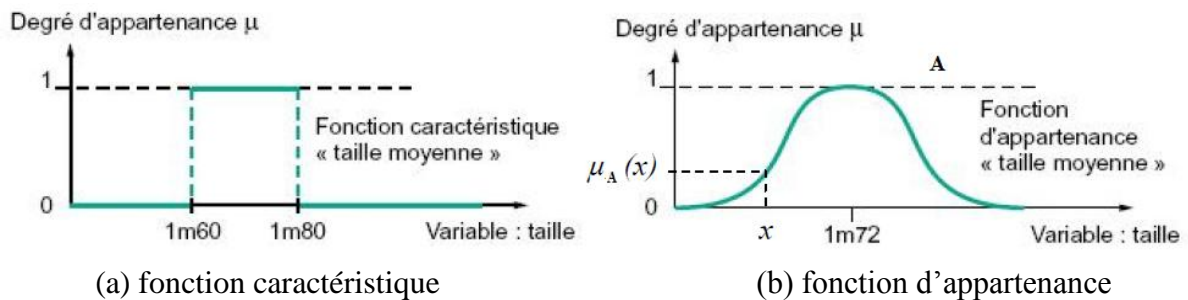


Figure 1.12. Fonction caractéristique et fonction d'appartenance

Plusieurs ensembles flous peuvent être définis sur la même variable, par exemple les ensembles « *taille petite* », « *taille moyenne* » et « *taille grande* », notions explicitées chacune par une fonction d'appartenance (Figure 1.13).

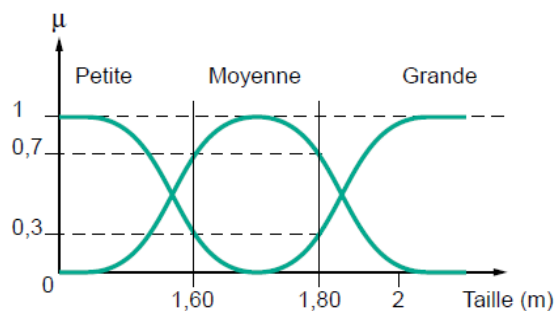


Figure 1.13. Fonction d'appartenance, variable et terme linguistique

Cet exemple montre la gradualité qui permet d'introduire la logique floue. Une personne de 1,80 m appartient à l'ensemble « *taille grande* » avec un degré 0,3 et à l'ensemble « *taille moyenne* » avec un degré de 0,7. En logique classique, le passage de moyen à grand serait brusque. Une personne de 1,80 m serait par exemple de taille moyenne alors qu'une personne de 1,81 m serait grande, ce qui choque l'intuition. La variable (par exemple : taille) ainsi que les termes (par exemple : moyenne, grande) définis par les

fonctions d'appartenance portent respectivement les noms de variable linguistique et de terme linguistique.

1.5.1.3. Règles floues

Une connaissance humaine peut être exprimée de la façon suivante :

Si X_1 est A_1 et X_2 est A_2 ... et X_n est A_n Alors Y est B

Dans cette règle, la combinaison des propositions « X_1 est A_1 », ..., « X_n est A_n » constitue la prémisse de la règle tandis que « Y est B » forme sa conclusion, X_1, \dots, X_n sont des variables floues d'entrée, Y est la variable de sortie correspondante. A_1, \dots, A_n et B sont des valeurs floues correspondantes.

Un exemple de règle floue est donné ci-dessous :

SI « la température est élevée », ALORS « la ventilation est forte ».

Dans cette règle, les termes linguistiques « élevée » et « forte » sont représentés par des sous-ensembles flous définis sur l'univers des variables « température » et « ventilation ». Lorsque la prémisse est définie par une seule variable, le degré de vérité est le degré d'appartenance de la valeur au sous-ensemble flou qui correspond à la prémisse.

1.5.1.4. Principe générale d'une commande par logique floue

La structure conventionnelle d'une commande floue est présentée par la Figure 1.14. Elle est composée de quatre blocs distincts qui sont : la fuzzification, le moteur d'inférence, la défuzzification et la base de règles.

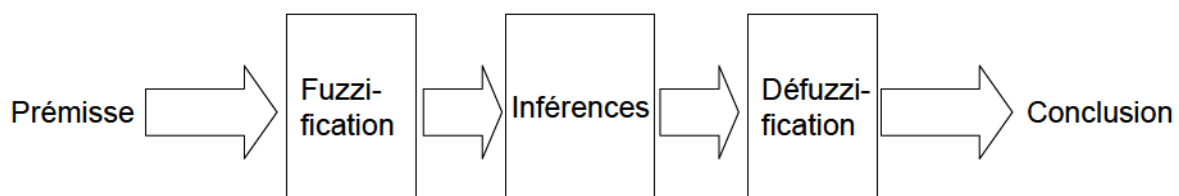


Figure 1.14. Structure conventionnelle d'une commande floue [Cao, 1997]

La fuzzification effectue la transformation d'une valeur réelle en une valeur linguistique à l'entrée du système. En d'autres termes, cette étape consiste à déterminer le degré d'appartenance de chaque variable d'entrée à chaque état. Celui-ci est déterminé à l'aide des fonctions d'appartenance définies dans le système.

Le moteur d'inférence est le cœur d'un système flou, qui possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire (inférer) les actions de commande floue à l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence dans la logique floue. Dans les inférences de régulateur par logique floue interviennent les opérateurs ET et OU (min et max). L'opérateur

ET s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle, tandis que l'opérateur OU lie les différentes règles.

Deux approches primaires permettent de générer des systèmes d'inférence floue : l'approche Sugeno [Takagi, 1985] et l'approche Mamdani [Mamdani, 1975]. Pour notre système nous avons principalement utilisé l'approche Mamdani, qui est physiquement plus interprétable car ses règles floues sont généralement extraites à partir des connaissances humaines et les conclusions des règles sont des valeurs floues

A la fin de l'inférence, l'ensemble flou de sortie est déterminé mais il n'est pas directement utilisable pour donner une information précise à l'opérateur ou commander un actionneur. Il est nécessaire de passer du «monde flou» au «monde réel», c'est la défuzzification. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser cette opération, mais pas de procédure permettant de conclure sur le choix de la meilleure méthode. Les méthodes les plus couramment utilisées sont la méthode du centre de gravité ou celle de la moyenne des abscisses des maximums.

1.5.1.5. Avantages et inconvénients de la logique floue

Les avantages de la logique floue, notamment dans son utilisation pour la conception de procédés et produits, peuvent être résumés dans les points suivants :

- Facilité d'implantation;
- Formalisation et intégration de l'expertise humaine sous forme de règles simples dans la conduite et le réglage d'un procédé ;
- Solutions efficaces et interprétables pour des problèmes complexes ;
- Combinaison de plusieurs sources d'informations avec des formats différents ;
- Robustesse vis-à-vis des incertitudes et des imprécisions.

La logique floue présente aussi quelques inconvénients :

- Les résultats sont moins précis en raison de l'introduction de la connaissance humaine ;
- Il n'existe pas de théorie générale qui caractérise rigoureusement la stabilité, la robustesse,...

1.5.2. Analyse factorielle

L'analyse factorielle est une méthode statistique descriptive, utilisée pour décrire la variabilité parmi les observations. Elle permet à la fois de représenter deux ou trois dimensions, le plus fidèlement possible, les individus d'une population, et aussi de détecter les liaisons entre les variables ainsi les variables séparant le mieux les individus. Elles font principalement appel à l'algèbre linéaire. Les techniques factorielles sont aussi un puissant

outil de réduction des dimensions d'un problème, qui permet de diminuer le nombre de variable étudiées en perdant le moins possible d'information. [Cibois, 2006].

La transformation, par l'analyse des correspondances multiples, de variables qualitatives en variables continues est assez régulièrement utilisée. Enfin l'analyse en composantes principales avec rotation permet de constituer des groupes de variables en s'appuyant sur leurs corrélations et est à la base d'un algorithme efficace de classification des variables.

1.5.2.1. Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) est une des plus anciennes techniques d'analyse statistique. Elle a été développée pour l'étude d'échantillon d'individus caractérisés par plusieurs facteurs. La méthode est donc adaptée à l'analyse de données multidimensionnelles, car l'étude séparée de chaque facteur ne suffit pas en général, car elle ne permet pas de détecter d'éventuelles dépendances entre facteurs.

Pour réduire le nombre de facteurs (composantes), l'ACP détermine des sous espaces vectoriels de dimension plus réduite que le nombre de paramètres, dans lesquels la répartition des points est préservée au mieux. Le critère retenu sur la répartition est l'inertie totale du nuage des points. L'ACP se présente donc comme une méthode de projection linéaire qui maximise l'inertie du nuage de point.

Quand les p variables décrivant les n facteurs sont toutes numériques, chaque facteur peut être représenté par un point dans un espace R^p à p dimensions. Quand $p \leq 2$, l'observation du nuage montre bien les distances entre facteurs. Cette observation devient plus difficile quand $p = 3$. Il est donc naturel de vouloir réduire l'espace R^p à R^2 ou R^3 .

L'ACP que nous allons utiliser dans notre système permet de projeter le nuage d'individus sur des sous espaces de dimension inférieure en respectant au mieux les distance entre individus. La détermination de ces sous espaces se fait axe par axe. Chaque individu x_i a un poids p_i . Ce poids est généralement $p_i = 1/n$ pour tout i . Mais nous pouvons accorder des poids différents à des individus appartenant à des sous-populations différentes. La somme des carrés des distances des individus x_i à leur centre gravité, multipliés par leur poids p_i est appelée inertie totale :

$$I = \sum_{i=1}^n p_i d(0, x_i)^2 \quad (1.5)$$

Le but de l'ACP peut se formuler comme consistant à trouver l'axe permettant de maximiser l'inertie projetée sur cet axe. L'inertie projetée sur un axe est par définition la somme des carrés des coordonnées v_i des individus sur l'axe, ces carrés étant pondérés par p_i . En d'autres termes, nous cherchons l'axe rendant la somme :

$$\sum_i p_i v_i^2 \quad (1.6)$$

maximale et donc plus proche possible de I . Cela revient à minimiser l'écart entre chaque individu et projection, c'est-à-dire à allonger au maximum la projection du nuage d'individus sur l'axe. Cela fait, nous cherchons un deuxième axe qui, parmi tous les axes, maximise l'inertie projetée sur ce deuxième axe.

1.5.2.2. Analyse des Correspondance Multiples (ACM) [Baccini, 2010]

L'analyse factorielle des correspondances, s'applique à des situations où les individus statistiques sont décrits par des variables nominales. Mais il est fréquent que nous disposons d'individus décrits par plusieurs (deux ou plus) variables nominales ou ordinales.

L'ACM est une extension de l'analyse factorielle des correspondances AFC. Nous nous plaçons donc dans la situation où nous disposons de N individus statistiques, décrits par Q variables nominales ou ordinales X_1, X_2, \dots, X_Q . L'ACM vise à mettre en évidence :

- les relations entre les modalités des différentes variables ;
- éventuellement, les relations entre individus statistiques ;
- les relations entre les variables, telles qu'elles apparaissent à partir des relations entre modalités.

L'AFC offre la particularité (contrairement aux ACP) de fournir un espace de représentation commun aux variables et aux individus. Pour cela l'AFC raisonne à partir de tableau réduit ou de fréquences. Pour les modèles développés nous avons utilisé la matrice de contingence forme de représentation des variables.

Rappelons que la matrice de contingence de deux variable qualitatives A et B , de modalité $(a_k)_k$ et $(b_l)_l$, est le tableau (x_{ij}) dans lequel :

La valeur x_{ij} = le nombre d'individus x tels que $A(x) = a_i$ et $B(x) = b_j$

Le test de X^2 permet de détecter une dépendance entre les deux variables. Les effectifs et la contribution au X^2 de chaque cellule du tableau de contingence montrent les liaisons entre modalités des deux variables : soit sureffectif (forte liaison positive), soit sous-effectif (forte liaison négative), soit équilibre (faible liaison).

Pour l'ACM nous ne pouvons pas se contenter du tableau de contingence simple mais une généralisation de ce tableau est nécessaire, appelé le tableau de contingence multiple ou tableau de Burt. Dans ce tableau carré symétrique, au lieu que les lignes correspondent aux modalités d'une seule variable, les colonnes aux modalités d'une autre, ce sont à la fois les lignes et les colonnes qui correspondent aux modalités de l'ensemble des variables X_1, X_2, \dots, X_p .

Les avantages des méthodes de l'analyse factorielle par rapport à la conception de produit industriels, peuvent être résumés dans les points suivants :

- Simplicité mathématique, méthodes et techniques simple à mettre en œuvre

- Simplicité des résultats, grâce aux graphiques qu'elle fournit, elle permet d'appréhender une grande partie de ses résultats d'un simple coup d'œil.
- Flexibilité, les méthodes s'appliquent sur un ensemble de données de contenu et de taille quelconques, qu'il s'agisse de données quantitatives (ACP) ou qualitative (ACM)

Néanmoins, l'analyse factorielle présente principalement l'inconvénient de la perte d'information forcément engendrée pour la génération des résultats, et la non prise en charge de la non linéarité des données.

1.5.3. Arbre de décision

Un arbre de décision [Larose, 2005] [Rokach et Maimon, 2008] est un outil d'aide à la décision et à l'exploration de données qui fait partie des outils usuels de la prise de décision, grâce à une arborescence représentant les différentes séquences possibles d'événements. Un arbre de décision est une structure de données particulièrement adaptée à des attributs linguistiques avec des valeurs limitées.

Généralement un arbre de décision est constitué de quatre ensembles (Figure 1.15) :

- Un nœud racine à partir duquel les données se départagent ;
- Des nœuds fils représentant les tests ;
- Les branches représentant les réponses ;
- Les feuilles ou nœuds terminaux représentant les différentes classes.

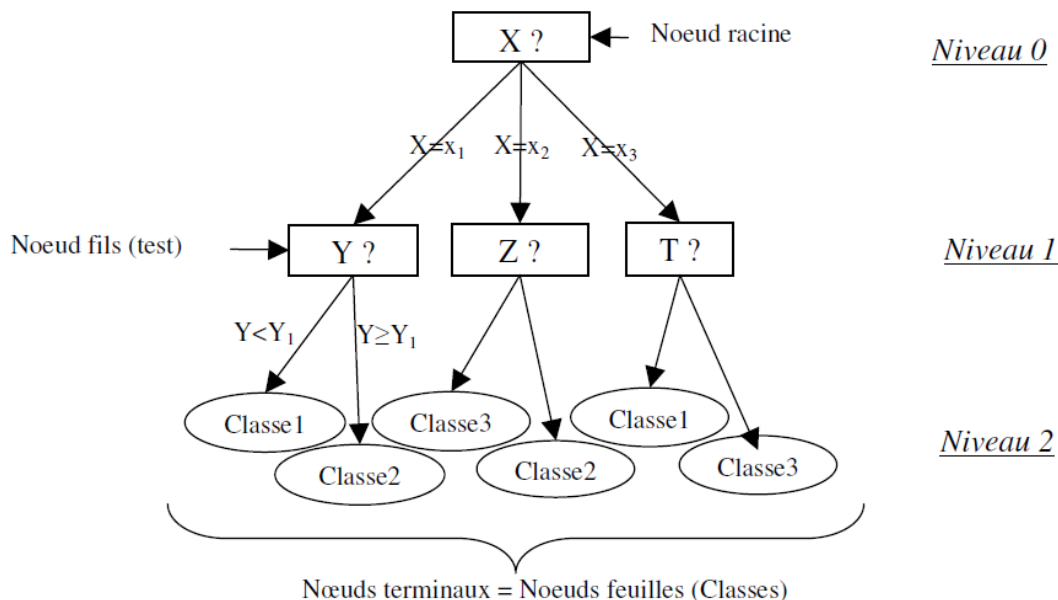


Figure 1.15. Schéma général d'un arbre de décision

Plusieurs critères sont utilisés pour choisir la meilleure séparation d'un nœud. Les plus répandus sont :

- Le critère du χ^2 lorsque les variables explicatives sont qualitatives ou discrètes (utilisé dans l'arbre CHAID) ;
- Le critère de *Gini*, pour tout type de variables explicatives (utilisé dans l'arbre de CART) ;
- Le critère *Twoing* ordonné, lorsque la variable à expliquer a $k \geq 3$ modalités ordonnées ;
- L'entropie, ou information, pour tout type de variables explicatives (utilisée dans les arbres C4.5 et C5.0)

Un autre critère qui différencie les méthodes entre elles, est le critère d'arrêt, pour décider si un nœud est terminal ou non, nous parlons ici d'élagage, qui est le nombre de niveau que nous pouvons supprimer afin d'optimiser la taille totale de l'arbre. Il existe deux façons de faire cette opération : le préélagage ou le post-élagage. Comme son nom l'indique le pré-élagage se fait pendant la construction de l'arbre alors que le post-élagage se fait après la construction de l'arbre.

Par rapport à la conception de produits industriels, l'utilisation des arbres de décision possède principalement les avantages suivants :

- Lisibilité du résultat pour les concepteurs : les résultats sont exprimés sous forme de conditions explicites sur les variables d'origine ;
- Traitement des variables quantitatives et qualitatives a la fois, notamment, avec les arbres C4.5, où les calculs consistant en des comparaisons numériques ($X \leq n$) ou des tests d'appartenance ($X \in \{a, b, c, \dots\}$), selon que X est une variable quantitative ou qualitative ;
- Pas de paramétrage difficile pour la construction de l'arbre ;
- Les arbres de décision sont peu perturbés par la présence d'individus hors norme, qui peuvent être isolés dans de petits nœuds et n'influent pas l'ensemble du classement, contrairement à ce qui se passe dans les techniques paramétriques et neuronales.

Les arbres de décision présente aussi quelques inconvénients :

- L'apprentissage d'un arbre de décision nécessite généralement un nombre suffisamment grand d'individus ;
- La définition des nœuds au niveau $n+1$ dépend énormément de celle au niveau n ;
- Test d'un seul attribut à la fois: coupes parallèles aux axes ;
- Non incrémental: recommencer la construction de l'arbre si nous voulons intégrer de nouvelles données.

1.5.4. Les cartes de Kohonen

Les cartes de Kohonen ou carte SOM (Self Organizing Map) [Principe et Miikkulainen, 2009] constituent une classe de réseaux de neurones artificiels fondés sur les

méthodes d'apprentissage non-supervisées. Elles sont utilisées pour cartographier un espace réel, c'est-à-dire pour étudier la répartition de données dans un espace à grande dimension.

Les cartes SOM se décomposent en couches de nœuds et en connexions entre ces nœuds. La grande différence avec les réseaux de neurones est qu'il n'y a ici pas de variable à prédire. Son but est d'apprendre la structure des données pour pouvoir y distinguer des classes.

Le réseau de neurone se décompose de deux niveaux (Figure 1.16)

- La couche d'entrée, avec un nœud pour chacune des n variables utilisées dans la classification.
- Une couche de sortie, dont les nœuds sont disposés sous forme de grille généralement carrée ou rectangulaire (parfois hexagonale) de $l \times m$ nœuds (nous pouvons avoir l et $m \neq n$), chacun de ces $l \times m$ nœuds étant connecté à chacun des n nœuds de la couche d'entrée, la connexion ayant un certain poids p_{ijk} ($i \in \{1, l\}$, $j \in \{1, m\}$, $k \in \{1, n\}$).

Les nœuds de la couche de sortie ne sont pas connectés entre eux mais une distance est définie entre eux, de sorte que nous pouvons parler du voisinage d'un nœud.

Les nœuds de la couche d'entrée correspondent aux individus à classer et cette couche sert à la présentation des individus ; les états de ses nœuds sont les valeurs des variables caractérisant les individus à classer. C'est pour cela que cette couche contient n nœuds, où n est le nombre de variables utilisées dans la classification.

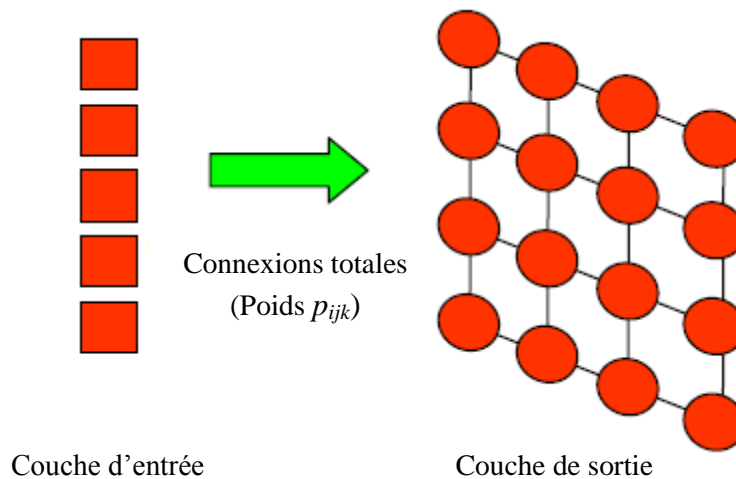


Figure 1.16. Réseau de Kohonen

La grille sur laquelle sont disposés les nœuds de la couche de sortie est appelée « carte topologique ». La forme et la taille de cette grille sont généralement choisies par l'utilisateur, mais elles peuvent aussi évoluer au cours de l'apprentissage. A chaque nœud (i,j) de sortie étant associé un vecteur de poids (p_{ijk}) $k \in \{1, n\}$, la réponse de ce nœud à un individu (x_k) , $x \in \{1, n\}$ est, par définition, la distance euclidienne :

$$d_{ij}(x) = \sum_{k=1}^n (x_k - p_{ijk})^2 \quad (1.7)$$

L'apprentissage d'un réseau de Kohonen se fait comme suit :

Après une initialisation aléatoire des valeurs des poids p_{ijk} , pour chaque individu (x_k) de l'échantillon d'apprentissage sont calculées les réponses des $l \times m$ nœuds de la couche de sortie.

Le nœud retenu pour représenter (x_k) est le nœud (i, j) pour lequel $d_{ij}(x)$ est minimum. Nous disons que ce nœud est activé ou le nœud gagnant. Ce nœud et tous les nœuds voisins voient leurs poids ajustés afin de les rapprocher de l'individu en entrée. La taille du voisinage démunie généralement au cours d'apprentissage : au début, le voisinage peut être la grille tout entière ; à la fin, le voisinage peut être réduit au nœud lui-même. Ces réglages font partie des paramètres du réseau (Figure 1.17).

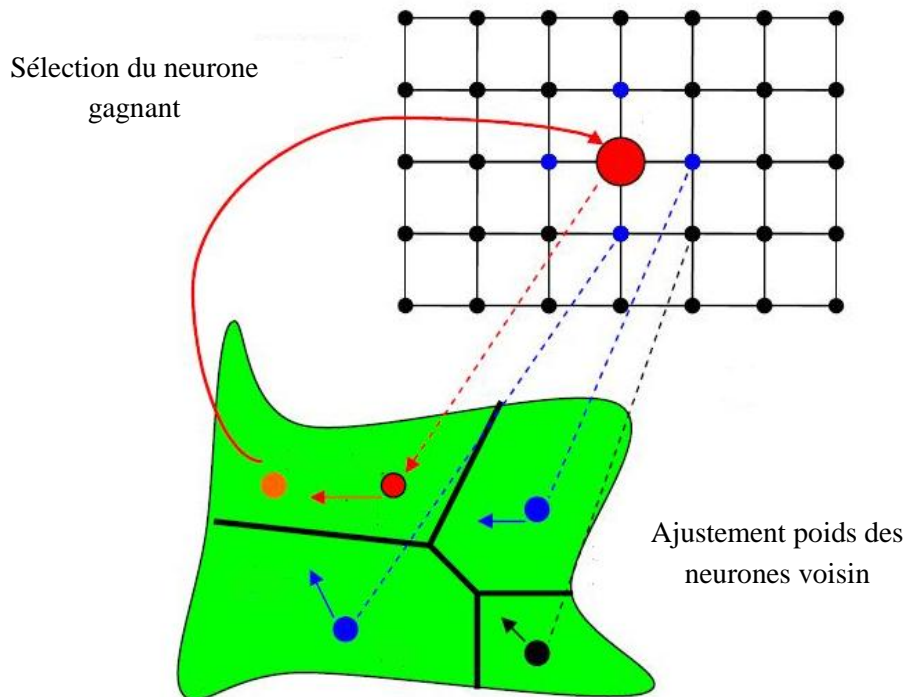


Figure 1.17. Activation d'un neurone d'un réseau de Kohonen

Les nouveaux poids d'un voisin (I, J) du gagnant (i, j) sont :

$p_{Ijk} + \Theta \cdot f(i, j ; I, J) \cdot (x_k - p_{Ijk})$ pour tout $k \in [1, n]$,
 où $f(i, j ; I, J)$ est une fonction décroissante de la distance entre les nœuds (i, j) et (I, J), telle que $f(i, j ; I, J) = 1$. Il peut ainsi s'agir d'une gaussienne : $\exp(-(i, j - I, J)^2 / 2\sigma^2)$

Le paramètre $\theta \in [0, 1]$, est un taux d'apprentissage qui, comme dans le cas de la perception multicouche, évolue au fil de l'apprentissage en décroissant, de façon linéaire ou exponentielle.

C'est l'extension de l'ajustement des poids à tout le voisinage du nœud gagnant, qui rapproche les nœuds voisins de (i,j) de l'individu (x_k) en entrée, et qui permet à des individus proches dans l'espace des variables d'être représentés par des nœuds identiques ou voisins de la couche. Une fois que tous les individus de l'échantillonnage d'apprentissage ont été présentés au réseau et que tous les poids ont été ajustés, l'apprentissage est achevé.

La fonction de transfert peut éventuellement être la fonction linéaire $f(x)=x$, mais il vaut mieux choisir une fonction qui présente un comportement linéaire au voisinage de 0 (lorsque les poids des nœuds sont petits), et non linéaire aux extrémités, ce qui permet de modéliser des phénomènes linéaires et non linéaires. Nous choisissons presque toujours une fonction *sigmoïde* et plus particulièrement la sigmoïde logistique

Les cartes de Kohonen présentent quelques avantages, en particulier pour leur utilisation à la conception de procédé et produit industrielle :

- Elles sont capables de mettre en évidence des tendances, et de s'adapter à des structures non linéaires ;
- Simplicité, rapidité et faible temps de calcul. Elles produisent une seule carte alors que les analyses classiques fournissent plusieurs représentations d'information ;
- Portabilité dans différents domaines d'application, notamment dans l'industrie, et pour la prise en charge de la connaissance humaine grâce à leurs cartographies dynamiques.

Les cartes de Kohonen présentent aussi quelques inconvénients :

- La lecture des résultats n'est pas toujours facile ;
- Le nombre de classe maximum est fixé a priori, ce qui ne donne pas une grande souplesse et flexibilité de calcul.

1.6. Applications à la conception des composites textiles

Ayant décrit les composants et les techniques du système d'aide à la conception industrielle, nous présentons maintenant le contexte général d'applications de notre système d'aide à la conception, qui consiste à concevoir de nouveaux produits et procédés industriels. Dans le cadre de ma thèse, deux applications ont été étudiées : optimisation d'un procédé de renfort par aiguilletage de structures composite textile et développement de matériaux biocomposites.

La première application concerne l'étude du procédé d'aiguilletage. Le premier objectif de l'étude, consiste à analyser la qualité de transfert de fibres d'une couche à une autre dans une structure bicouche obtenue par aiguilletage perpendiculaire, en choisissant les bonnes aiguilles et comprendre leur comportement et compatibilités en fonction des fibres. Cette étude est importante pour l'application des textiles à la création de composites. Le

modèle créé dans le système d'aide à la conception nous permettra aussi d'étudier les relations performance renfort/paramètres procédé/structure des nontissés et des relations performance, procédé/paramètres et procédé/structure des nontissés.

Le système d'aide à la conception de procédé sera utilisé pour cette étude, notamment la sélection et l'analyse des facteurs de conception les plus pertinents, afin de réduire la complexité du modèle en limitant le nombre de variables d'entrée, pour cela plusieurs méthodes (nouvelles ou classiques) ont été utilisées afin de réaliser l'étude expérimentale sur le procédé d'aiguilletage. Ces méthodes comprennent les arbres de décision établis à partir des données expérimentales de différentes catégories, les cartes de Kohonen utilisées à partir des connaissances des experts sur les procédés, et l'analyse en composantes principales (ACP) et les analyses de variances afin notamment d'étudier les corrélations entre les variables. Le second objectif de l'étude, consiste à étudier l'influence des paramètres d'aiguilletage appliqués à des structures nontissées bicouches, et à extraire des informations sur le comportement des aiguilles en fonction de différentes natures de fibres utilisées pour les matériaux textiles ou composites. Cette étude s'est conduite sur un procédé d'aiguilletage classique (angle d'aiguilletage fixe à 90°, sans séparation entre les couches) et en comparaison avec le procédé NAPCO (angle d'aiguilletage fixe à 90°, avec séparation entre les deux couches). Les résultats de cette étude seront présentés dans le chapitre 3.

La deuxième application concerne le développement de matériaux biocomposites à base de fibre végétale. Ces matériaux répondent notamment à de nouvelles réglementations plus exigeantes qui vont dans le sens de la qualité de vie et à la préservation de la santé des usagers, cette classe de matériaux concurrence aussi d'un point de vue mécanique les matériaux traditionnels. L'objectif de l'étude est de remplacer les matériaux composites qui sont généralement conçus avec des renforts ou résines issus de la pétrochimie, ces produits présentent la source principale de pollution pour l'environnement [Vroman, 2012]. Pour cela nous allons étudier l'influence des fibres de renfort (Etoup/ Lin 80/ Lin 120/ Lin affiné, Fibre de verre) et de résine (PP/ PLA/ PA11) sur les performances mécaniques (contrainte de traction, module en flexion, résistance au choc) et acoustiques (absorption) des matériaux biocomposites, et évaluer les performances et optimisation des produits réalisés. Pour cette étude nous avons utilisé les trois outils d'aide à la conception, d'abord la sélection et l'analyse des facteurs de conception les plus pertinents pour simplifier le modèle d'étude, ensuite la détermination des zones de fonctionnement pour caractériser les relations entre les facteurs de conception et les critères de qualité définis, enfin l'évaluation multicritère et hiérarchique des prototypes réalisés par rapport aux critères de qualité retenus, afin d'obtenir des informations sur la performance des produits et connaître l'impact de chaque critère sur la performance globale du produit, pour procéder à des améliorations techniques sur le produit. Les résultats de cette étude seront présentés dans le chapitre 4.

1.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'abord un état de l'art sur l'aide à la décision, comprenant les notions de base et les différentes méthodes de calcul. En nous appuyant sur les

systèmes d'aide à la décision, nous nous orientons vers les problèmes d'aide à la conception de nouveau procédé et produits industriels. C'est un domaine complexe en raison de nombreuses contraintes, en particulier de la multitude des facteurs de conception et de critères de qualité. Ces contraintes sont liées aux matières premières, aux paramètres de procédé ou aux paramètres de structure. Au terme de ce chapitre nous constatons la richesse et les potentialités de l'aide à la décision pour la conception industrielle. Néanmoins, plusieurs problèmes ont été rencontrés lors de développement de ces outils d'aide à la conception, en particulier le problème de traitement des variables qualitatives et l'intégration de la connaissance humaine dans la démarche de modélisation. Ainsi les améliorations ont été proposées afin de mieux prendre en compte la complexité liée au développement de nouveaux matériaux. Ces améliorations conduisent au développement de nouveaux outils d'aide à la conception par intégration de données quantitatives expérimentales et de connaissances humaines. Pour résoudre les problèmes rencontrés, nous nous proposons d'utiliser les techniques de calcul intelligent, comprenant la logique floue, les arbres de décision et les cartes de Kohonen. Ces méthodes constituent ainsi, une alternative intéressante aux modèles classiques pour améliorer le développement d'outils d'aide à la conception de nouveau procédés et produits. L'ensemble des outils améliorés pour l'aide à la conception sera présenté en détail dans le chapitre 2. La performance de ces outils a été validée à travers deux applications suivantes : la maîtrise d'un procédé textile de renfort par aiguilletage et le développement de matériaux biocomposites.

Chapitre 2 - Développement d'un système intelligent d'aide à la conception

2.1. Introduction

Par rapport aux travaux décrits précédemment sur les outils d'aide à la conception, réalisés dans notre équipe [Deng, 2008], mes contributions, effectuées dans le cadre de ma thèse doctorale, se résument ci-dessous.

- 1) Réalisation d'un système informatique d'aide à la conception par organisation optimale de données et de variables, intégrant l'ensemble des outils développés précédemment, et par création des interfaces d'utilisateurs conviviales. Pour cela, les diagrammes UML (Unified Modelling Language) et l'architecture objet DIC (Donnée, Interface, Contrôle), ont été utilisés pour la formalisation des données et des fonctionnalités du système, et pour modélisation des relations complexes concernant l'aide à la conception des matériaux.
- 2) Amélioration des outils d'aide à la conception par la prise en compte des variables qualitatives. Pour cela, Les arbres de décision ont été choisis pour modéliser les relations complexes intégrant à la fois des variables quantitatives et qualitatives, qu'elles soient linguistiques ou nominales.
- 3) Amélioration des outils d'aide à la conception par la prise en compte de la connaissance humaine. Pour cela, la carte de Kohonen, issue d'une famille de réseaux de neurones, a été choisie afin d'exprimer les connaissances des experts sur les procédés et les produits.

Quelques autres améliorations ont été également développées sur les outils 2 et 3 afin de réduire la complexité des modèles proposés et rendre le calcul plus efficace.

2.2. Aide à la conception des matériaux composites/textiles

Le système d'aide à la conception que nous développons est essentiellement destiné à la conception des matériaux composites/textiles, pour répondre à la diversité des cahiers des charges des produits à développer et concevoir rapidement des matériaux fibreux multifonctionnels, en diminuant la complexité des relations entre les produits, les procédés et les structures des matériaux, et en facilitant l'exploitation et l'analyse des résultats des plans d'expériences afin de réaliser une recherche heuristique optimale pour obtenir des points de fonctionnement pertinents tout en minimisant le coût d'exploration de l'espace.

Le système d'aide à la conception développé comprend une série de modèles caractérisant les relations propriété/structure/procédé, créés à partir d'une base de données expérimentales et de connaissances des experts. Les outils développés dans ce système conduisent à la compréhension des structures des matériaux et des procédés de fabrication, à

la prédiction des performances des produits finaux (ici les composites), ainsi qu'à l'optimisation des structures de matériaux et des procédés par rapport à une demande personnalisée de l'utilisateur.

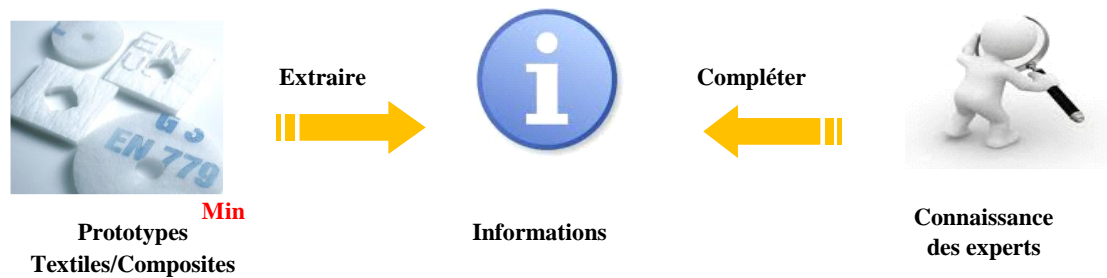


Figure 2. 1. Structure générale du système développé

La Figure 2.1 montre la structure générale de notre système, dont le principe consiste à extraire un maximum d'information fiable à partir d'un minimum de prototypes réalisés tout en recherchant un compromis entre les évaluations retournées par les connaissances des experts et les résultats d'analyse de données extraites. Ainsi notre système a pour objectif de :

- Faciliter la mise au point au développement de nouveaux procédés et produits textiles et composites.
- Fournir une meilleure présentation des résultats d'analyse.
- Améliorer la capacité de l'utilisateur à contrôler le processus de conception.

L'idée principale est de valider les produits en utilisant les connaissances d'experts et de les tester à travers une série limitée de prototypes. Cette idée conduit à l'élaboration de méthodes spécifiques pour étudier les relations entre les propriétés demandées (cahier des charges) et les facteurs de conception (matières premières, la structure du produit, la configuration et les paramètres de processus, etc.).

Le système développé intervient pratiquement sur tout le processus de développement de structures de nontissées et de composites (Figure 2.2), que ce soit pour le développement de nouveaux procédés ou la production des nouveaux produits, pour les différents domaines d'application (filtration, acoustique, automobile, etc).

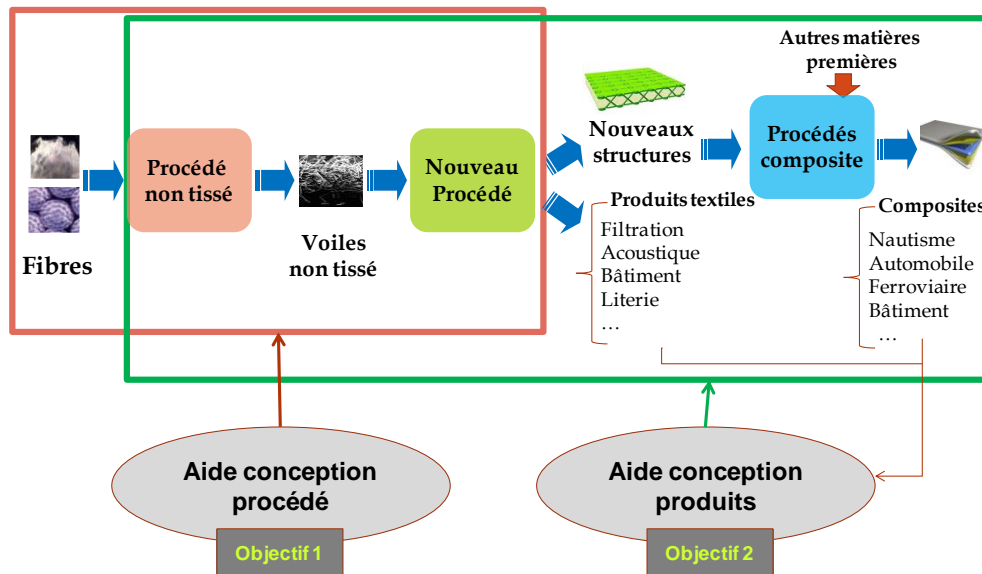


Figure 2. 2. Intervention du système d'aide à la conception dans le processus de développement de structures nontissées et composites.

2.3. Architecture informatique du système d'aides à la conception

Notre système d'aides à la conception des matériaux a été développé par utilisation du langage UML (Unified Modeling Language). En fait, UML est un langage de conception qui « fournit les fondements pour spécifier, construire, visualiser et décrire les artefacts d'un système logiciel » [UML, 2000] [Giroux, 2004][Roques, 2009]. Au sein de ce système, les outils de conception décrits dans le Chapitre 1 ont été formalisés et informatiquement développés selon la structure orientée objet MVC (Model-View-Controller) [Pope, 1988]. Le système comprend donc trois composants fonctionnels : Donnée, Interface, Contrôle, notés DIC.

2.3.1. Diagrammes de UML

UML est capable de proposer neuf types de diagrammes. Dans notre développement, nous nous intéressons particulièrement aux deux diagrammes, soit le diagramme de cas d'utilisation et le diagramme de classe.

2.3.1.1. Diagramme de cas d'utilisation

Un diagramme de cas d'utilisation (« use case » en anglais), décrit le comportement du système de point de vue utilisateur. Dans ce contexte, l'utilisateur est considéré comme la personne impliquée dans la phase de conception. Le diagramme de cas d'utilisation a pour principal objectif de capturer les fonctionnalités couvertes par le système. Il modélise ainsi tout ce qui interagit avec les acteurs [Roques, 2009]. La notion de scénarios interagit le système par rapport aux actions de l'utilisateur. La Figure 2.3 présente le diagramme de cas d'utilisation de notre système, ainsi que les différentes relations qui peuvent exister entre les fonctionnalités.

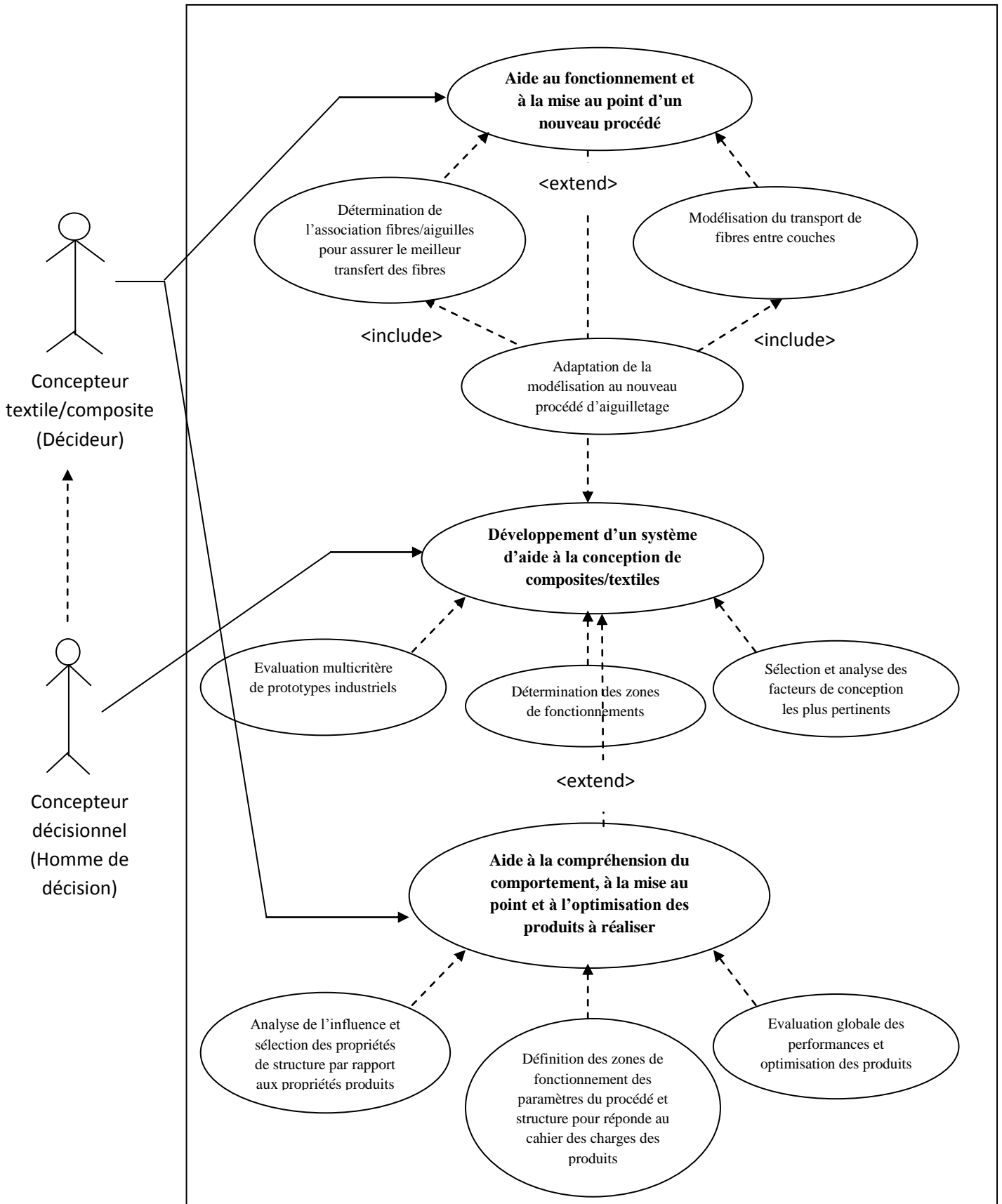


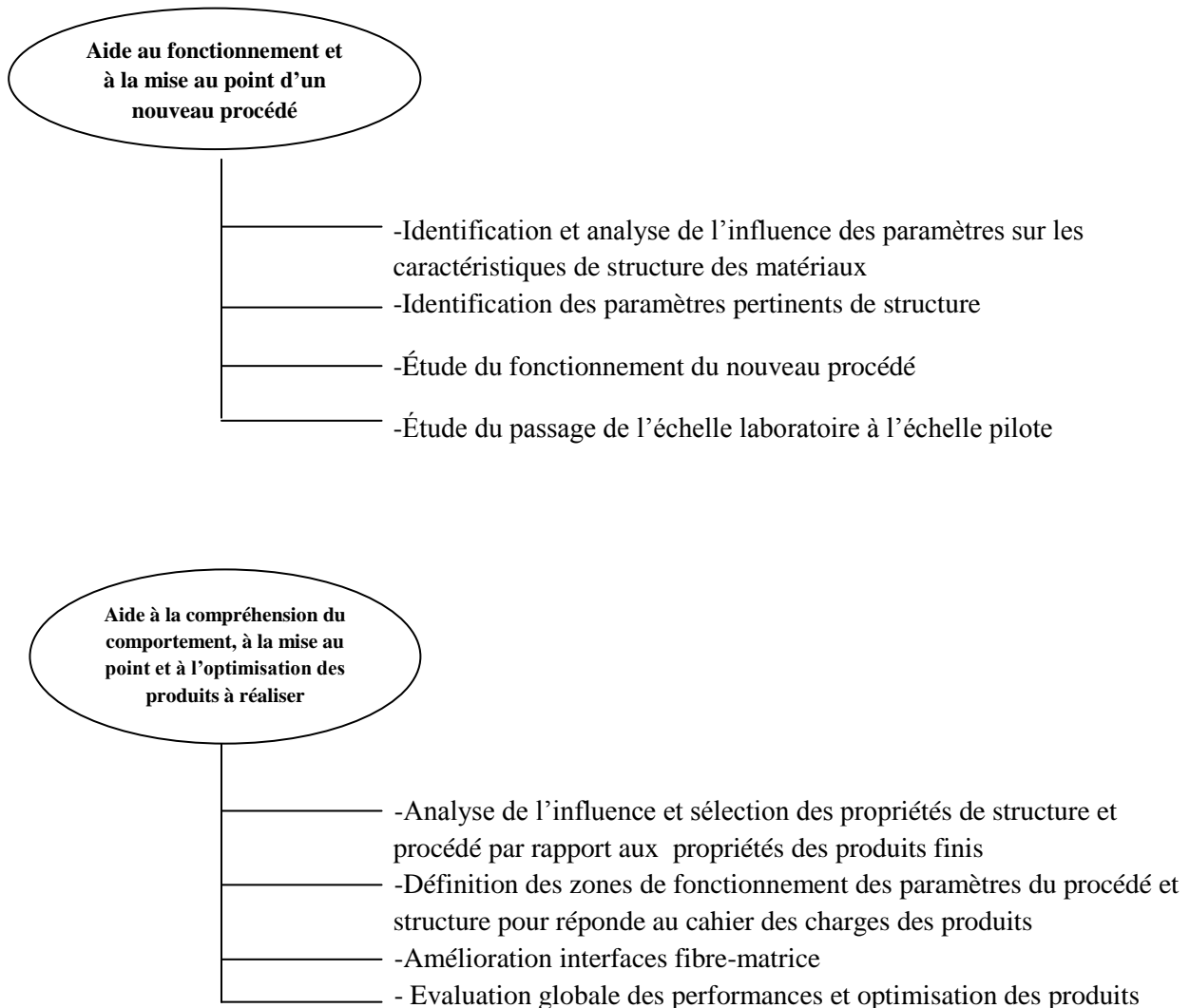
Figure 2. 3. Diagramme de cas d'utilisation

La Figure 2.4 présente les scénarios de réalisation des trois principaux cas d'utilisation du système :

Cas d'utilisation 1 : Aide au fonctionnement et à la mise au point d'un nouveau procédé.

Cas d'utilisation 2 : Développement d'un système d'aide à la conception de composites/textiles

Cas d'utilisation 3 : Aide à la compréhension du comportement, à la mise au point et à l'optimisation des produits à réaliser



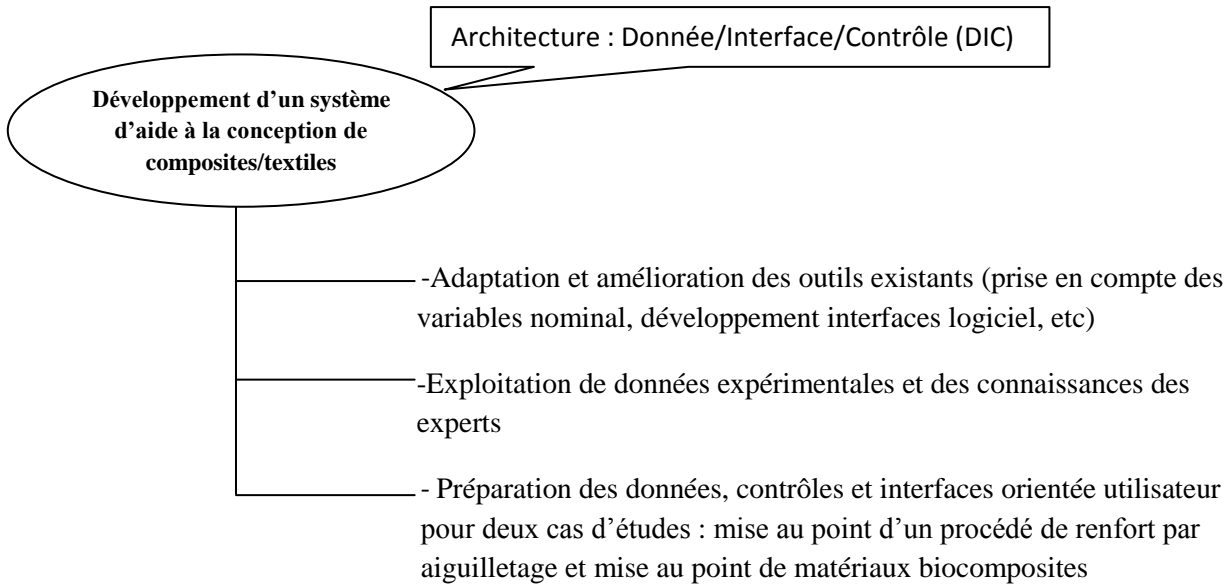


Figure 2. 4. Scénarios de réalisation des trois principaux cas d'utilisation du système

2.3.1.2. Diagramme de classe simplifié

Le diagramme de classes présente les classes et les interfaces des systèmes ainsi que les différentes relations entre celles-ci.

Une classe décrit les responsabilités, le comportement et le type d'un ensemble d'objets. Les éléments de cet ensemble sont les instances de la classe. Une classe est définie par un ensemble de fonctions et de données que nous appelons attributs.

Le diagramme de classe simplifié du système présenté dans la Figure 2.5 illustre la relation existant entre les trois principaux objets du système, à savoir les données, les interfaces, et les contrôles.

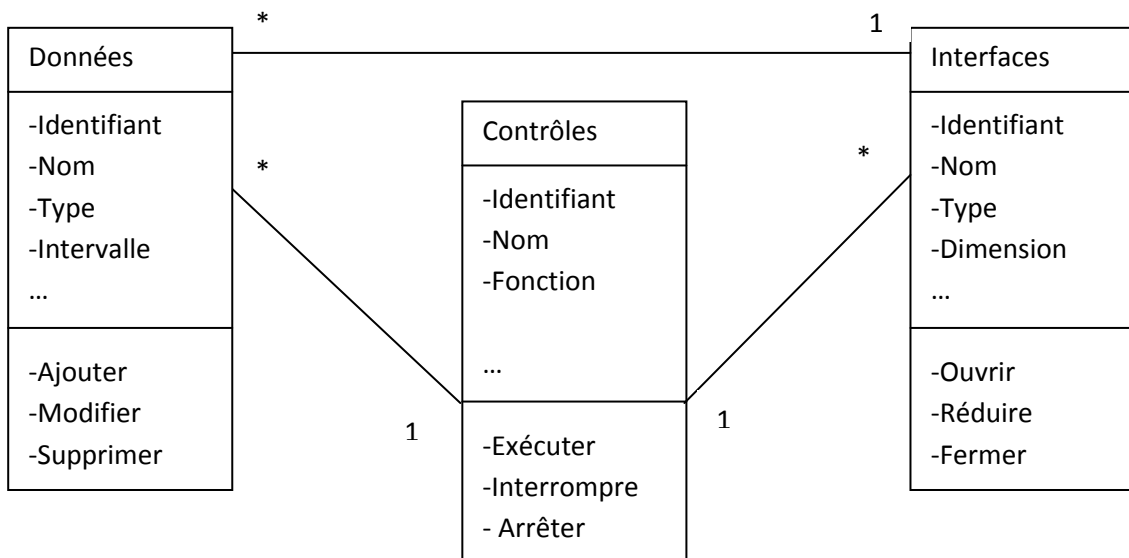


Figure 2. 5. Diagramme de classe simplifié du système

Les classes peuvent être liées entre elles grâce au mécanisme d'héritage qui permet de mettre en évidence les relations de parenté. D'autres relations sont également possibles entre des classes. Chacune de ces relations est représentée par un arc spécifique dans le diagramme de classes.

Dans la Figure 2.6, nous présentons principalement les relations d'association. Par exemple, une instance de la classe « Données » ne peut avoir qu'une seule interface avec la classe « Interfaces » : (Association = 1). Une instance de la classe « Interfaces » peut présenter une multitude de données de la classe « Données » : (Association = *). Cette figure décrit l'affichage d'une instance d'un objet de la classe « Données », pour un type d'aiguille utilisée dans le développement d'un produit.

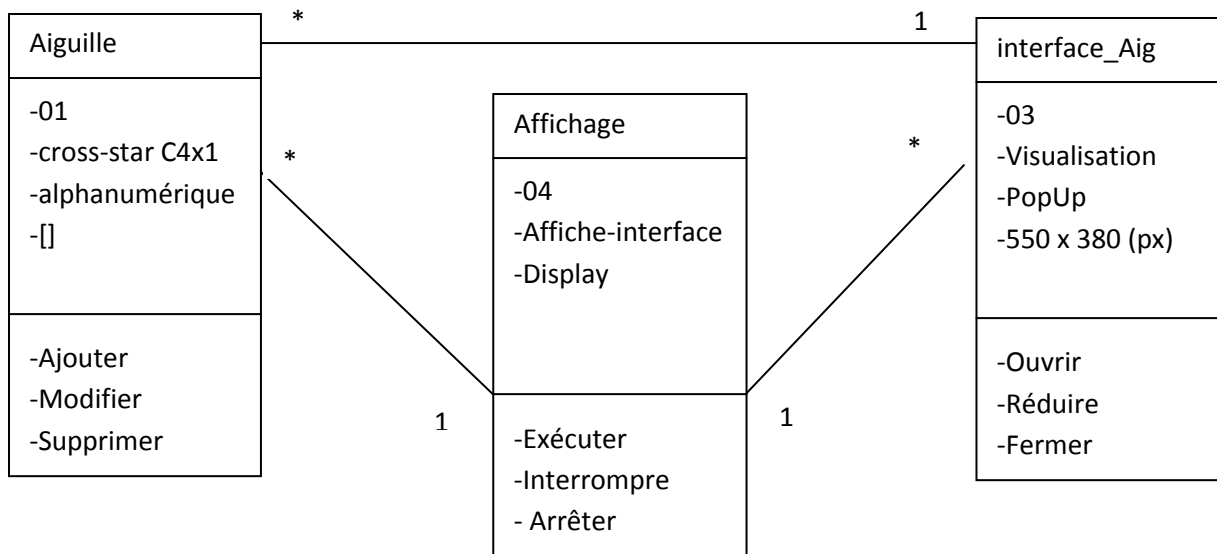


Figure 2. 6. Affichage d'une instance de l'objet « Aiguille »

2.3.2. Architecture DIC (Donnée / Interface / Contrôle)

L'architecture Donnée/Interface/Contrôle (DIC) permet de diviser le système informatique développé en trois composants afin d'assurer une organisation optimale des interactions entre l'utilisateur et le système d'aide à la conception (Figure 2.7).

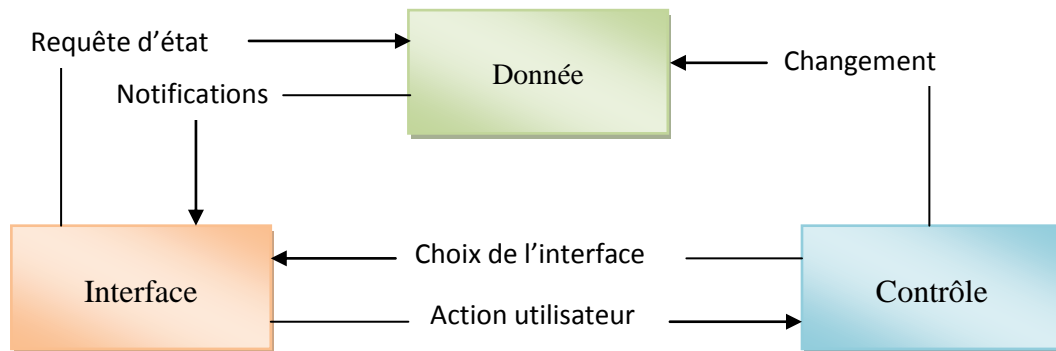


Figure 2. 7. Architecture DIC (Donnée / Interface / Contrôle)

Le composant Donnée, gère les données du système, comprenant les données quantitatives, qualitatives et les connaissances humaines. Son support comprend un système de gestion de base de données MYSQL et plusieurs fichiers de données Excel.

Le composant Interface est le moyen d'interaction avec l'utilisateur. Sa finalité est d'instaurer un dialogue entre l'homme et le système. Sa première fonction consiste à présenter les résultats envoyés par le modèle. Sa deuxième fonction consiste à recevoir les actions de l'utilisateur (acquisition de données). La vue n'effectue aucun traitement mais elle dispose d'un ensemble d'interfaces homme/machine pour interagir avec l'utilisateur (boutons, cases à cocher, listes déroulantes, ...). Les interfaces des outils ont été développées principalement avec l'outil GUIDE (Graphical User Interface Design Environment) de Matlab, [Biran, 2004] [Lapresté, 2005] [Matlab, 2012].

La Figure 2.8 montre l'interface d'accueil du système. D'autres interfaces seront présentées dans les Chapitre 3 et Chapitre 4 dans le cadre de développement de nouveau procédé et de nouveau matériaux.

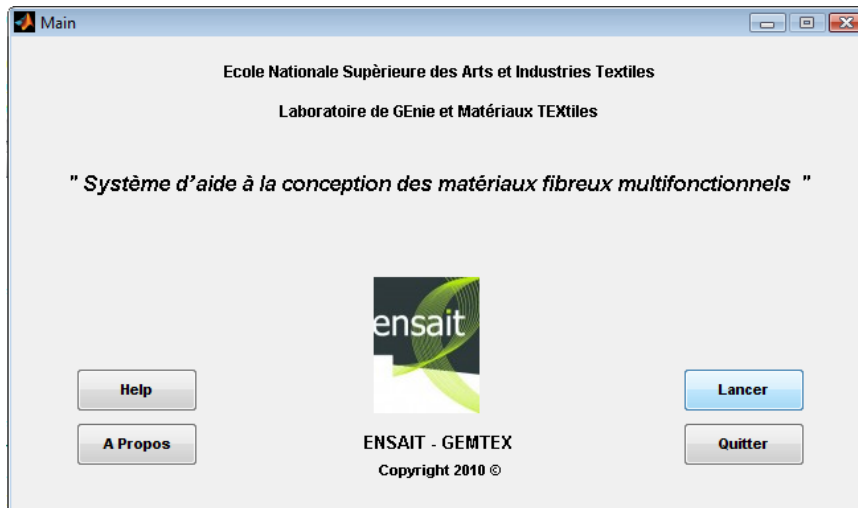


Figure 2. 8. Interface d'accueil du système d'aide à la conception

Le composant Contrôle comprend trois contrôles qui correspondent aux trois outils d'aide à la conception :

Contrôle 1 : Sélection et analyse des facteurs de conception les plus pertinents (Outil 1).

Contrôle 2 : Détermination des espaces de fonctionnement (Outil 2).

Contrôle 3 : Évaluation globale des prototypes (Outil 3).

La Figure 2.9 récapitule les trois outils, ainsi que leur intervention dans le processus de production et l'évaluation des prototypes des matériaux fibreux.

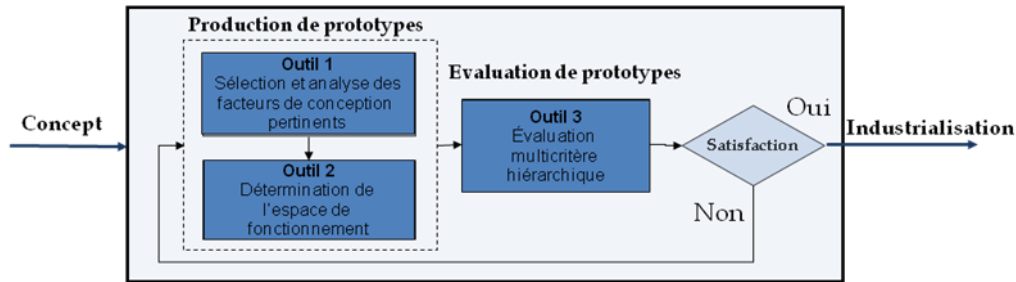


Figure 2. 9. Outils d'aide à la conception utilisés

Les modèles mathématiques développés précédemment [Deng, 2008] ont été regroupés dans le composant Contrôle. Dans le cadre de ma thèse doctorale, ces modèles ont été améliorés puis mis en œuvre informatiquement dans ce composant. Afin d'assurer une présentation intégrale du système développé, nous décrivons brièvement ci-dessous les fonctions les plus importants de ces modèles.

2.4. Présentation des travaux existants

Nous allons dans ce qui suit, présenté les travaux qui ont été déjà réalisés pour le développement d'outils d'aide à la conception de nouveaux matériaux multifonctionnels [Deng, 2008], ainsi que les améliorations proposées pour chacun de ces outils.

2.4.1. Contrôle 1 : Sélection et analyse des facteurs de conception les plus pertinents

L'essentiel de cet outil est de développer un critère de pertinence globale afin de sélectionner les facteurs de conception les plus pertinents par rapport à un critère de qualité spécifique. Ce critère de pertinence combine, par un modèle flou, le critère de sensibilité des données mesurées et la conformité de la connaissance humaine pour le même critère de qualité.

Le critère de sensibilité floue (SF_{kl}) d'un facteur de conception x_k (variables d'entrée) par rapport à un critère de qualité y_l (variable de sortie) se définit selon les deux principes suivants (Modèle $M1$) :

- 1) *SI une faible variation d'une variable d'entrée provoque une grande variation à la sortie, ALORS la sensibilité de cette variable est grande.*
- 2) *SI une forte variation d'une variable d'entrée provoque une petite variation à la sortie, ALORS la sensibilité de cette variable est petite.*

La conformité des connaissances humaines (CCH_{kl}) combine les jugements de plusieurs experts et les poids de pondération associés, qui permet de transmettre l'information qualitative et incomplète sur les relations entre les critères de qualité et les facteurs de conception en valeurs numériques. Ces derniers sont calculés à partir des niveaux des experts, des degrés de confiance ainsi que des dissimilarités (distances) entre les experts (Modèle $M2$).

La fusion des deux critères précédents permet de générer le critère de la pertinence global (CPG_{kl}) par utilisation des règles floues indiquées dans le tableau 2.1 (Modèle $M3$).

Tableau 2. 1. Règles floue pour produire le critère CPG

| Critère de pertinence global CPG_{kl} | | Critère de conformité des connaissances humaine CCH_{kl} | | |
|--|------------|---|-------|------------|
| | | Petit | Moyen | Grand |
| Critère de sensibilité flou SF_{kl} | Très petit | Très petit | Petit | Petit |
| | Petit | Petit | Moyen | Moyen |
| | Moyen | Petit | Moyen | Moyen |
| | Grand | Moyen | Moyen | Grand |
| | Très grand | Grand | Grand | Très grand |

La procédure de génération du critère de pertinence global est illustrée dans la Figure 2.10.

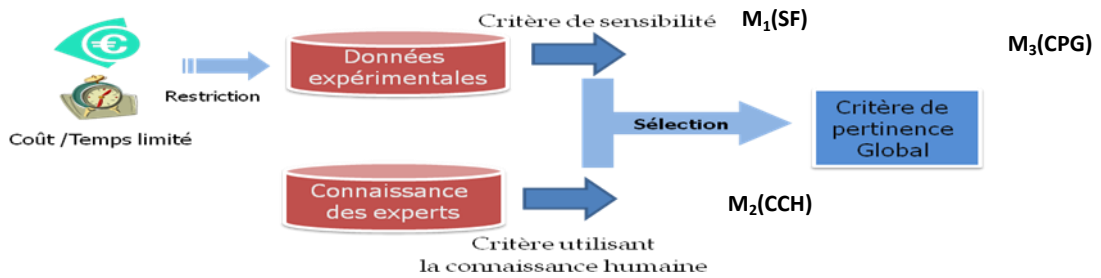


Figure 2. 10. Génération du critère de pertinence global

Dans le modèle flou générant le critère de pertinence global, SF_{kl} et CCH_{kl} sont considérés comme variables d'entrée et CPG_{kl} comme variable de sortie. Les fonctions d'appartenance sont présentées dans la Figure 2.11. Les fonctions d'appartenance de CCH_{kl} sont notées $Trimf(x,[e, e, f])$, $Trimf(x,[e, f, g])$ et $Trimf(x,[f, g, g])$, avec les paramètres e, f, g définis comme suit :

$$e = \min_k\{HKC_{k,i}\}, g = \max_k\{HKC_{k,i}\} \text{ et } f = (e + g)/2 \quad (2.1)$$

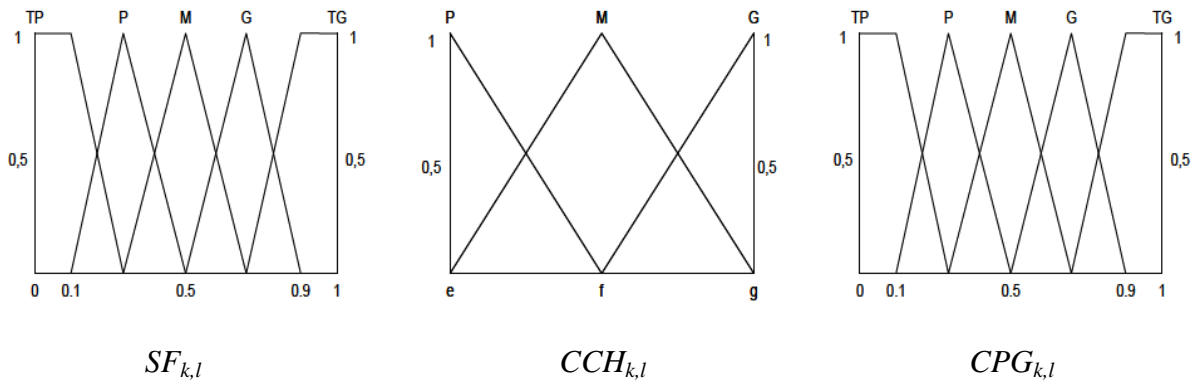


Figure 2. 11. Fonctions d'appartenance $SF_{k,l}$, $CCH_{k,l}$ et $CPG_{k,l}$

Le CPG est normalisé sur l'intervalle $[0,1]$. De cette manière, plus la valeur de $CPG_{k,l}$ est proche de 1 , plus la variable x_k est sensible à la sortie y_l . Plus la valeur de $CPG_{k,l}$ est proche de 0 , plus la variable x_k est moins sensible à la sortie y_l .

Afin de simplifier la procédure de sélection des variables pertinents, nous utilisons l'algorithme K-Means [Hartigan, 1979] pour classer les valeurs de $CPG_{k,l}$ en plusieurs classes en fonction du problème d'application traité.

Une interface a été proposée pour représenter les résultats de la sélection des facteurs de conception pertinents (Figure 2.12). Elle permet de trier toutes les valeurs du critère de pertinence global de manière décroissante, afin de faciliter la visualisation des facteurs de conception (F_c) les plus pertinents pour un critère de qualité (C_l).

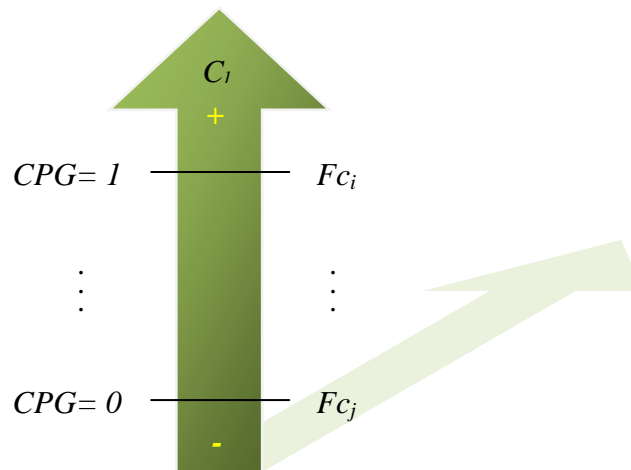


Figure 2. 12. Interface pour la visualisation des facteurs de conception les plus pertinents avec leurs critères de pertinence

Le critère de pertinence a été appliqué, avec succès, à de nombreux scénarios de conception de matériaux multifonctionnels. Pourtant, cette démarche est basée sur l'hypothèse que tous les facteurs de conception et les critères de qualité sont des grandeurs numériques. Pourtant, il existe de nombreux paramètres qualitatifs pour les produits et les procédés, tels que la couleur, le type de fibres, le type de machine, etc. L'intégration des variables

qualitatives dans le critère de pertinence est importante pour améliorer les outils d'aide à la conception existants.

2.4.2. Contrôle 2 : Détermination des espaces de fonctionnement

La détermination des espaces de fonctionnement, permet de partitionner, de façon quasi-optimale, l'espace des facteurs de conception (en particulier les paramètres du procédé) et d'extraire des règles floues caractérisant les relations entre les facteurs de conception et les critères de qualité. Elle conduira d'une part, à déterminer les futures zones d'investigation pour la réalisation de nouveaux prototypes (particulièrement utile dans le cas où les critères de qualité ne sont pas remplis) et d'autre part, à définir une plage de fonctionnement de fabrication qui répond au cahier des charges. En utilisant cet outil, nous pouvons réaliser une série de prototypes représentatifs permettant une convergence rapide vers les critères de qualité prédéfinis tout en minimisant le nombre d'essais. Une partie de cet outil a été déjà développé au cours d'une thèse [Deng, 2008], nous avons amélioré cet outil en **réduisant les corrélations entre les facteurs de conception**. Ceci nous permettra de considérer l'espace de fonctionnement pertinent comme une zone de tolérance des facteurs de conception par rapport aux critères de qualité. Cet espace peut être utilisé comme un indicateur de surveillance en ligne dans la phase d'industrialisation [Laouisset, 2011a].

Le processus de détermination de cet espace comporte trois grandes étapes :

Etape 1 : Définition du degré d'acceptabilité d'un prototype

Pour cet outil, nous définissons un nouveau « *degré d'acceptabilité* » pour les prototypes d'apprentissage. Ces valeurs sont normalisées sur l'intervalle $[0, 1]$, qui va nous permettre de quantifier la satisfaction d'un prototype pour chaque critère de qualité. Le principe de cette définition est le suivant : plus le critère de qualité d'un prototype est proche de son intervalle de satisfaction, plus le degré d'acceptabilité est proche de 1. Au contraire, plus le critère de qualité est éloigné de son intervalle de satisfaction, plus le degré d'acceptabilité est proche de 0. La valeur 1 signifie que le prototype est complètement satisfaisant. La valeur 0 signifie que le prototype est complètement insatisfaisant. Le degré d'acceptabilité d'un prototype peut être calculé en utilisant une fonction d'appartenance trapézoïdale (connu aussi par la courbe de préférence selon le langage d'aide à la décision) proposée dans la Figure 2.13.

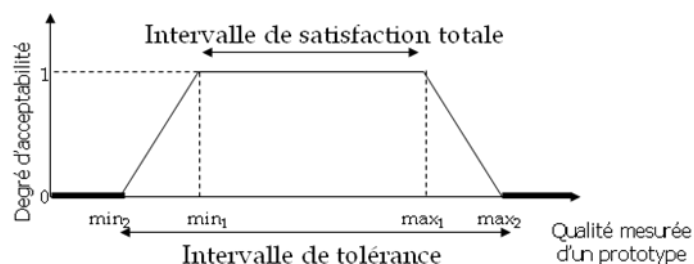


Figure 2. 13. Fonction d'appartenance proposée pour estimer le degré d'acceptabilité d'un prototype pour un critère de qualité spécifique.

Dans la Figure 2.13, nous pouvons constater que le degré d'acceptabilité est divisé en trois zones. $[min1, max1]$ représente l'intervalle de satisfaction complète dans lequel le degré d'acceptabilité est 1. $[min2, min1]$ et $[max1, max2]$ représentent deux intervalles de tolérance dans lesquels le degré d'acceptabilité varie, de façon linéaire, avec la distance entre la valeur du critère de qualité et l'intervalle de satisfaction complète. Tous les prototypes à l'extérieur de l'intervalle de tolérance $[min2, max2]$ doivent être rejetés (l'intervalle de rejet) et les degrés d'acceptabilité correspondants sont nuls.

Etape 2 : Modélisation de la relation degré d'acceptabilité / facteurs de conception

Nous procédons à la modélisation de la relation entre le degré d'acceptabilité et les facteurs de conception selon les deux phases suivantes :

Phase 1 : En prenant les facteurs de conception comme variables d'entrée et le degré d'acceptabilité globale comme variable de sortie, nous obtenons un modèle à multiples entrées et à une seule sortie.

Phase 2 : Dans les travaux précédents [Deng, 2008], les corrélations entre les facteurs de conception sélectionnés ont été considérées comme inexistantes ou trop faibles. Les variables d'entrée ont été traitées de façon indépendante. Dans la pratique, les corrélations entre les facteurs de conception existent toujours. Le traitement d'une variable d'entrée provoque certainement des variations des autres. Ainsi, pour éliminer ou réduire les corrélations et les correspondances qui existent entre les facteurs de conception, nous avons proposé de convertir l'espace original des facteurs de conception en un sous espace dans lequel les axes sont orthogonaux (Figure 2.14). Dans notre cas d'étude, nous utilisons la méthode ACP pour réaliser cette conversion d'espace. Cette opération peut effectivement réduire l'espace des facteurs de conception s'ils sont tous des variables numériques.

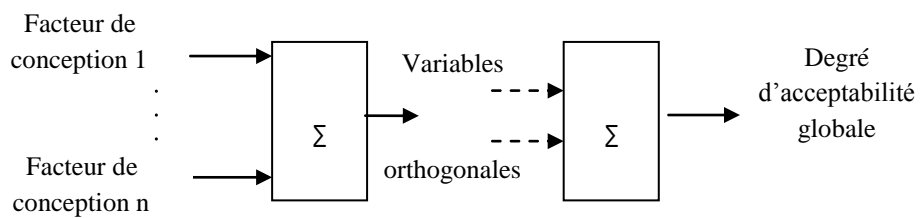


Figure 2. 14. Conversion des facteurs de conception en variables orthogonales

Phase 3 : En appliquant la méthode ABE [ABE, 1995] et les données d'apprentissage mesurées sur les prototypes, nous divisons l'espace d'entrée en hyper-volumes et ainsi nous obtenons une série de règles floues caractérisant la relation entre ces hyper-volumes et les sous intervalles de la sortie. A partir de ce modèle, nous pouvons estimer la valeur du degré d'acceptabilité globale pour un prototype quelconque, permettant ainsi de fabriquer de nouveaux produits correspondant aux valeurs maximales de la fonction d'acceptabilité globale.

Etape 3 : Recherche de l'espace de fonctionnement pertinent

Pour faciliter la recherche de l'espace de fonctionnement pertinent, nous avons proposé, pour chaque axe ou facteur de conception, quatre intervalles (Figure 2.15) :

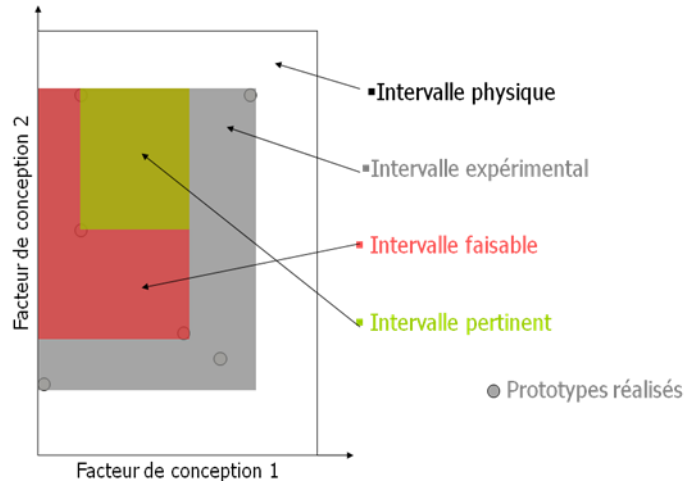


Figure 2. 15. Intervalles proposés pour la recherche de l'espace de fonctionnement pertinent

Intervalle physique : qui représente l'espace total d'investigation.

Intervalle expérimental : qui correspond à l'espace réel d'investigation.

Intervalle faisable : c'est l'espace des prototypes satisfaisant les critères de qualité définis dans le cahier des charges.

Intervalle pertinent : correspond à l'espace pour optimisation des produits.

Dans notre étude nous nous intéressons particulièrement aux deux intervalles : faisable et pertinent.

➤ Espace de fonctionnement faisable

Un espace de fonctionnement faisable correspond aux grandes valeurs de la fonction d'acceptabilité globale. Les valeurs des facteurs de conception pour la génération des nouveaux prototypes satisfaisant aux critères de qualité peuvent être extraites à partir de cet espace selon une stratégie définie plus tard. Cet espace de fonctionnement faisable se génère de la façon suivante :

D'abord, nous divisons l'intervalle de chaque facteur de conception en un nombre de sous intervalles de taille identique, délimités par l séparateurs. De cette manière, l'espace de fonctionnement est divisé en hyper-volumes de taille égale. L'espace de fonctionnement faisable X_λ est l'ensemble des hyper-volumes dans lesquels toutes les valeurs de la fonction d'acceptabilité globale sont supérieures au seuil λ , prédéfini par les experts du produit et les opérateurs du procédé. Evidemment, l'espace de fonctionnement faisable se constitue d'un nombre limité w de régions continues à l'intérieur mais séparées entre elles, notée $Reg_1^\lambda, \dots, Reg_i^\lambda$. Ensuite, nous calculons, pour chaque région continue $Reg_i^\lambda, (i \in \{1, \dots, w\})$, le centre de

gravité X_i^λ , correspondant au séparateur le plus proche de la moyenne des points de fonctionnement dans cette région (Figure 2.16).

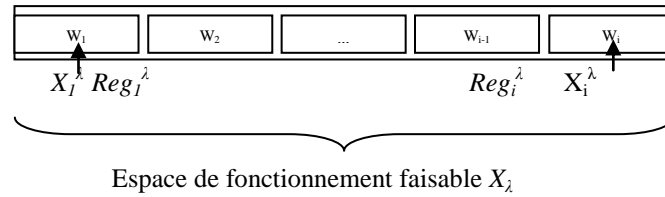


Figure 2. 16. Définition de l'espace de fonctionnement faisable

➤ **Espace de fonctionnement pertinent**

Bien que les centres de gravité des régions Reg_i^λ , ($i \in \{1, \dots, w\}$), ne soient pas certainement dans l'espace de fonctionnement faisable, ils constituent le point de départ pour rechercher des points pertinents de fonctionnement satisfaisant aux critères de qualité. Dans la pratique, la plupart de ces centres de gravité sont assez proches des points de fonctionnement pertinents et peuvent se converger rapidement vers ces points avec un nombre faible d'essais.

Pour cela, nous définissons, pour chaque centre de gravité X_i^λ , une probabilité de récompense, notée R_{ik} , caractérisant l'intérêt de rechercher dans la région Reg_i^λ suivant les axes des facteurs de conception x_k ($k \in \{1, \dots, m\}$). Plus la valeur de R_{ik} est élevée, plus la recherche est intéressante depuis le centre de gravité X_i^λ suivant l'axe x_k dans la région Reg_i^λ .

Une interface a été aussi développée pour la visualisation des différents intervalles de fonctionnement pour chaque facteur de conception (Figure 2.17), ainsi que la distribution des prototypes sur chaque intervalle. Une présentation qui aidera le concepteur à visualiser facilement l'intervalle pertinent correspondant à l'espace pour l'optimisation des produits réalisés.

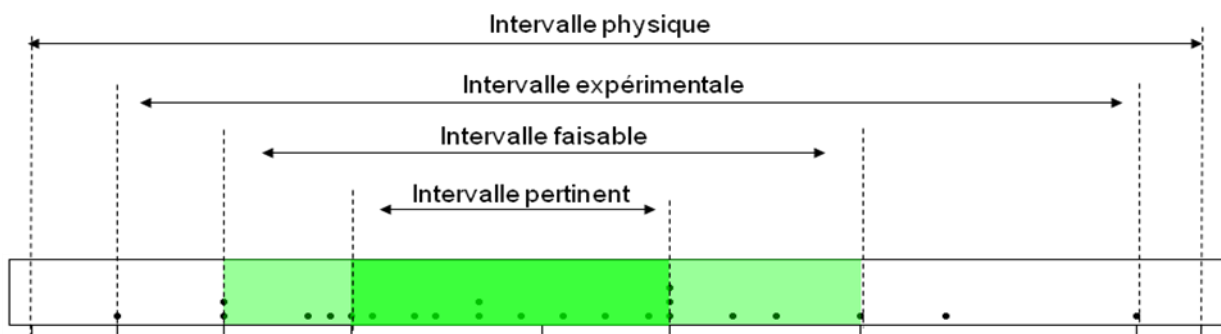


Figure 2. 17. Exemple d'une interface pour la visualisation des intervalles de fonctionnements pour un facteur de conception

Les modèles développés pour le Contrôle 2 sont efficaces si tous les facteurs de conception et les critères de qualité sont des variables numériques. Ils ne peuvent pas traiter correctement des variables qualitatives, en particulier des variables nominales.

2.4.3. Contrôle 3 : Evaluation multicritère et hiérarchique

Le troisième contrôle, correspond à l'évaluation des prototypes. Après leur production, une étape très importante vient pour compléter le processus de conception des nouveaux matériaux, qui est l'évaluation des prototypes par rapport aux critères de qualité retenus. L'objectif de cette étape permet d'obtenir des informations sur la performance des produits et également de connaître l'impact de chaque critère de qualité sur la performance globale du produit, afin de procéder à des améliorations techniques sur le produit [Thurston, 1991].

L'évaluation de prototypes industriels est considérée comme un problème d'aide à la décision multicritère, permettant d'évaluer un nombre limité d'alternances prédéterminées et d'en choisir une solution la plus pertinente au problème étudié. [Dyer, 1992], [Hwang, 1981]. Ces alternances sont généralement évaluées en plusieurs niveaux dont chacun comprend des multiples critères quantitatifs et qualitatifs.

La démarche s'appuie principalement sur les travaux de Deng et Lu [Lu, 2008], [Deng, 2008], qui consiste à tracer une structure hiérarchisée générale pour l'évaluation globale des prototypes (Figure 2.18). Elle comporte trois niveaux : aspects (niveau 1), critères (niveau 2) et indicateurs (niveau 3). A chaque niveau, nous définissons des poids, qui permettent de donner une importance relative à chaque critère de qualité pour tous les nœuds de la structure. Une amélioration de cet outil a été proposée concernant l'agrégation des résultats d'évaluation des différents niveaux. Généralement l'évaluation globale des produits à différents niveaux prend en compte les poids des critères définis en tant que paramètre quantitatif, **Dans notre approche, les poids de pondérations sont basés sur des variables linguistiques, afin de faciliter le rôle des concepteurs.** Dans ce contexte, la technique floue est la plus adaptée pour traiter la subjectivité des concepteurs et tenir compte des incertitudes des données et des informations qualitatives [Laouisset, 2010].

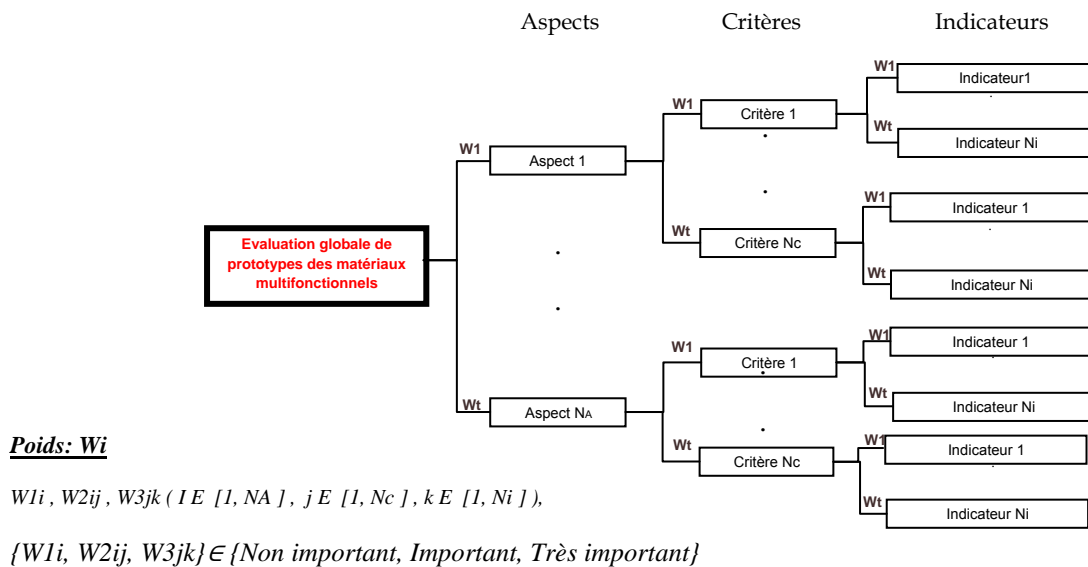


Figure 2. 18. Structure hiérarchique générale pour l'évaluation globale des prototypes

Le processus d'évaluation hiérarchique des prototypes se résume ci-dessous.

Etape1: Détermination des niveaux d'évaluation et les des poids de pondération

Nous définissons d'abord un group composé de n experts $P = \{P_k \mid k=1,2, \dots, n\}$ et un ensemble de m prototypes à évaluer $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$, $m \geq 2$. Les prototypes de S sont évalués par les experts de P en trois niveaux dont les critères d'évaluation évoluent.

Nous définissons $C = \{C_1, C_2, \dots, C_t\}$ comme étant l'ensemble de critères d'évaluation en niveau 1. Ces critères sont les plus abstraits et donc appelés aussi orientations. Chaque orientation C_i peut se décomposer en un ensemble de critères plus concrets appelés catégories, soit $C_i = \{C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{ij_i}\}$ avec $i \in \{1, 2, \dots, t\}$. Il s'agit des critères d'évaluation en niveau 2. De la même manière, chaque catégorie du niveau 2 C_{ij} peut se décomposer aussi en éléments plus concrets, appelés indicateurs.

Nous pouvons alors obtenir $C_{ij} = \{C_{ij1}, C_{ij2}, \dots, C_{ijk_{ij}}\}$, $j \in \{1, 2, \dots, j_i\}$ en niveau 3, appelés indicateurs. Il ya deux types d'indicateurs: directe ou indirecte. Les indicateurs directs sont mesurés par les appareils, les indicateurs indirects sont calculés à partir des paramètres directs en utilisant des règles physiques. Dans cette structure hiérarchisée, l'évaluation d'un critère plus abstrait du niveau inférieur peut se calculer à partir des évaluations de ses sous critères plus concrets du niveau supérieur.

Ensuite, nous introduisons les poids de pondération pour chaque critère dans les trois niveaux; $W_c = (W_1, W_2, \dots, W_t)$, correspondant aux poids associés aux critères du niveau 1. Les W_c peuvent prendre des valeurs floues à partir d'un ensemble prédéfini $W_{C_i} \in \{Non\ Important\ (NI),\ Important\ (I),\ Très\ Important\ (TI)\}$, notés et désignées respectivement $a_1=0.2$, $a_2=0.6$, $a_3=0.9$ (Figure 2.18). De la même manière nous définissons les poids des autres niveaux.

Etape 2 : Génération de préférence individuelle

Cette étape est divisée en trois niveaux. Le premier est pour exprimer un degré de préférence du produit. Pour cela, nous définissons $sc_{ij}^{yk} = \{sc_{ij1}^{yk}, sc_{ij2}^{yk}, \dots, sc_{ijk_{ij}}^{yk}\}$ comme degré de préférence du prototype S_k par rapport à la catégorie C_{ij} et à l'expert P_y avec $i \in \{1, 2, \dots, t\}$, $j \in \{1, 2, \dots, j_i\}$, $k \in \{1, 2, \dots, m\}$, $y \in \{1, \dots, n\}$, où sc_{ijz}^{yk} est considéré aussi comme une variable floue qui prend des valeurs à partir de l'ensemble $\{Non\ acceptable\ (NA),\ Acceptable\ (A),\ Très\ acceptable\ (TA)\}$, notés et désignées respectivement $b_1=0.2$, $b_2=0.6$, $b_3=1$. Le deuxième niveau consiste à calculer le degré de préférence par rapport à une orientation CS_i^{yk} du prototype S_k , à l'orientation C_i et à l'expert P_y ($i \in \{1, 2, \dots, t\}$, $k \in \{1, 2, \dots, m\}$ et $p \in \{1, \dots, n\}$). Le calcul s'effectue sur des nombres flous de la façon suivante :

$$CS_i^{yk} = WC_i \times SC_i^{yk} = \sum_{j=1}^{j_i} WC_{ij} \times SC_{ij}^{yk} \quad \text{avec} \quad SC_{ij}^{yk} = \sum_{z=1}^{k_{ij}} WC_{ijz} \times SC_{ijz}^{yk} \quad (2.2)$$

Enfin nous calculons le degré de préférence pour l'ensemble des orientations du prototype S_k par rapport à l'expert P_y . Le calcul s'effectue sur des nombres flous de la façon suivante :

$$D_k^y = CS^{y^k} \times WC = \sum_{i=1}^t CS_i^{y^k} \times WC_i \quad (2.3)$$

Etape 3 : Agrégation floue des résultats

La dernière étape est l'agrégation floue des résultats, qui consiste à projeter le poids du degré de préférence sur le degré d'acceptabilité. La zone de projection sera utilisée pour calculer l'agrégation floue des résultats.

Deux types de valeurs d'évaluation ont été proposés : une évaluation absolue pour l'évaluation d'un prototype par rapport à tous les critères d'évaluation et une évaluation relative qui permet de comparer tous les prototypes pour chaque critère de qualité.

Pour un indicateur quantitatif, son degré d'acceptabilité est généré par utilisation de la fonction d'appartenance de la Figure 2.20, quant aux indicateurs qualitatifs, son degré d'acceptabilité est évalué en fonction d'un groupe d'évaluateurs. Chaque degré est ensuite transformé en valeurs floues de $\{Non\ acceptable\ (NA),\ Acceptable\ (A),\ très\ acceptable\ (TA)\}$, qui correspondent respectivement aux fonctions d'appartenance $trampf(x, [-0,6, -0,4, 0,4, 0,6])$, $trampf(x, [0,4, 0,6, 0,7, 0,9])$ et $trampf(x, [0,7, 0,9, 1,1, 1,3])$, comprises entre $[0,1]$. Ensuite, les poids de chaque indicateur, prennent des valeurs dans $\{Non\ important\ (NI),\ Important\ (I),\ Très\ important\ (TI)\}$. Ces valeurs correspondent respectivement aux fonctions d'appartenance $trimf(x, [-0,5, 0, 0,5])$, $trimf(x, [0, 0,5, 1])$ et $trimf(x, [0,5, 1, 1,5])$, comprises entre $[0,1]$.

Par exemple: Si indicateur "1" est «Acceptable» et son poids de pertinence est de "0,2" l'indicateurs "2" est «Pas acceptable » et son poids de pertinence est de "0.8", alors la fusion des deux projections donne une agrégation floue, représenté dans la Figure 2.19.

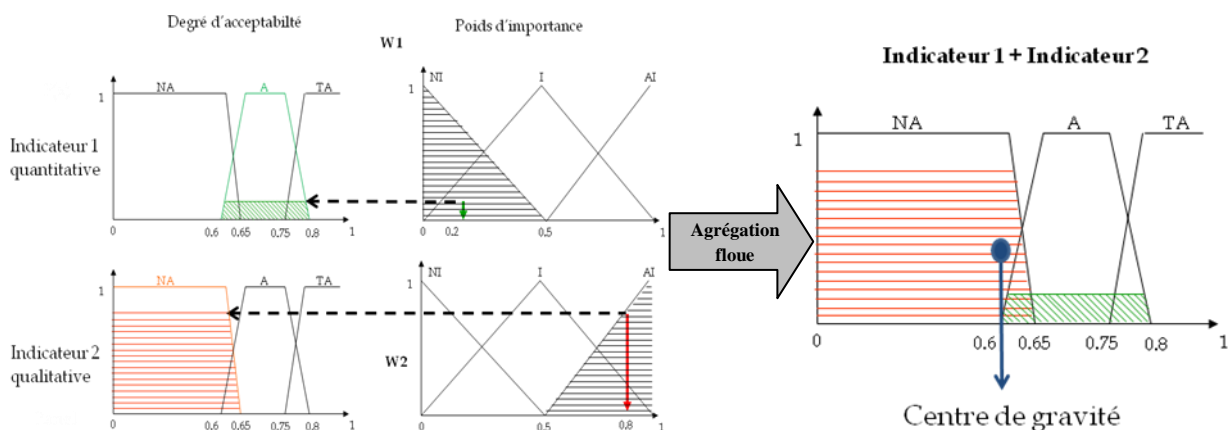


Figure 2. 19. Exemple d'agrégation floue de deux indicateurs, quantitative et qualitative

Une fois que les valeurs de deux indicateurs sont fusionnées, nous accumulons de même le degré d'acceptabilité avec un nouvel indicateur. Selon ce principe, nous pouvons combiner les degrés d'acceptabilité pour tous les critères de qualité et leurs aspects liés à chaque niveau de la structure.

Nous pouvons calculer par la suite, le degré relatif de la performance des prototypes par rapport à l'évaluation globale. Le degré relatif de la performance permet de vérifier les performances et les limites de chaque prototype en fonction de chaque indicateur de qualité.

En s'appuyant sur l'architecture DIC et les trois composants du Contrôle décrits précédemment, nous présentons, dans les sections suivantes, les travaux concernant la modélisation avec des variables qualitatives et le traitement de connaissance humaine des experts. Les nouveaux modèles développés se situent également dans le composant Contrôle de l'architecture DIC.

2.5. Prise en compte de la connaissance humaine et des variables qualitatives

Les outils d'aide à la conception existant négligent la prise en compte de la connaissance humaine et des variables qualitatives. Pourtant, dans la réalité, la pratique professionnelle (connaissances acquises avec l'expérience quotidienne de l'homme), est souvent un moyen efficace pour enrichir et compléter l'apprentissage par des données ainsi la validation des résultats générés par les modèles théoriques des outils. De plus, la conception d'un produit ou d'un procédé nécessite le traitement de nombreuses variables qualitatives. Ces variables doivent être prises en compte dans les modèles du système d'aide à la conception.

Comme nous avons indiqué précédemment, le problème essentiel d'aide à la conception de produits est de caractériser les relations entre l'espace des facteurs de conception et l'espace des critères de qualité. Pour modéliser les relations entre ces deux espaces, deux techniques de classification sont utilisées : les arbres de décision et les cartes de Kohonen.

Les arbres de décision sont utilisés au premier lieu pour étudier la pertinence des facteurs de conception situés dans les nœuds des arbres par rapport aux critères de qualité situés aux feuilles des arbres. Un arbre de décision est généré par minimisation de l'entropie lors de la segmentation. Il permet aussi de prendre en compte simultanément les variables qualitatives et quantitatives (discrètes ou continues). Par contre, les arbres de décision représentent un inconvénient important. Comme les résultats issus d'un arbre de décision correspondent généralement à des intervalles assez grands, la précision est souvent très faible [Janikow, 2006]. C'est pour cela une deuxième classification est nécessaire pour raffiner ces résultats, grâce aux cartes de Kohonen. Ces techniques sont souvent utilisées pour modélisation des relations non linéaires, et pour une meilleure visualisation et interprétation des résultats. Elles sont aussi utilisées pour la prise en compte de la connaissance humaine.

2.5.1. Modélisation avec les arbres de décision

Dans cette section, la modélisation de la relation entre les facteurs de conception et les critères de qualité est réalisée à partir de données d'apprentissages mesurées sur les échantillons par utilisation des arbres de décision.

Les avantages de cette approche par rapport à la conception de produit peuvent être résumés comme suit [Deng, 2010], [Laouisset, 2011b].

- 1) il est plus efficace pour le traitement des variables linguistiques, en particulier les variables nominales, souvent existant parmi les paramètres de conception;
- 2) les règles extraites d'un arbre de décision sont plus faciles à être interprété par les concepteurs.

Dans cette thèse, nous construisons des arbres de décision en utilisant l'algorithme C4.5 [Rokach, 2008]. Il s'agit d'une méthode entropique pour sélectionner, à chaque étape, l'attribut le plus pertinent en maximisant le gain d'information. Cet algorithme est très utilisé car il génère des procédures de classification exprimables sous forme de règles.

Les concepts concernés pour la modélisation avec les arbres de décision sont formalisés comme suit :

Soit S un ensemble de n échantillons représentatifs d'une collection, notée $S = \{s_1, \dots, s_n\}$.

Soit A un ensemble de p critères de qualité, caractérisant la qualité des produits en S , notée $A = \{A_1, \dots, A_p\}$. Ces critères de qualité comprennent essentiellement des propriétés fonctionnelles des produits.

Soit $\{C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{ig(i)}\}$ l'ensemble des modalités ou classes du critère de qualité A_i . Ces classes sont définies par les experts selon leur expérience professionnelle sur les produits. Ces modalités sont définies grâce à la fonction d'appartenance présentée précédemment (Section 2.4.2), pour estimer le degré d'acceptabilité d'un prototype pour un critère de qualité spécifique. Pour des différents critères de qualité, les nombres de classes, notés $g(i)$, sont différents.

Soit D un ensemble de q facteurs de conception (paramètres des matériaux, paramètres du procédé,...), notée $D = \{D_1, \dots, D_q\}$.

Soit $\{M_{k1}, M_{k2}, \dots, M_{kh(k)}\}$ l'ensemble des modalités ou classes du facteur de conception D_k . Ces classes sont définies par les experts selon leur expérience professionnelle sur les produits et les procédés. Pour des différents facteurs de conception, les nombres de classes, notés $h(k)$, sont différents.

Les modalités ou classes des facteurs de conception et du critère de qualité constituent respectivement un découpage sur l'espace d'entrée et un découpage sur l'espace de sortie pour le modèle proposé.

Pour le problème de classification, nous pouvons utiliser la fonction d'entropie suivante pour mesurer l'hétérogénéité des données :

$$H(S, A_i) = - \sum_{S_k \in S} \sum_{j=1}^{g(i)} P(S_k \in C_{ij}) \log_2(P(S_k \in C_{ij})) \quad (2.4)$$

où $P(S_k \in C_{ij})$ est la probabilité a priori de la classe C_{ij}

Nous allons construire un arbre de décision TR_i pour chaque critère de qualité A_i ($i \in \{1, \dots, p\}$) par apprentissage des données mesurées sur tous les échantillons dans S . Pour des raisons de simplicité, nous considérons que chaque nœud sur TR_i correspond à seul un paramètre de conception numérique ou linguistique et ne peut générer que deux branches.

Pour un nouveau produit caractérisé par ses valeurs spécifiques de paramètres de conception $D = (d_1 \dots d_q)$, selon le principe des arbres de décision, si D peut être représenté par la combinaison de tous les échantillons existants S_1, \dots, S_n , nous obtenons une seule règle de TR_i (un chemin de l'arbre de décision partant de la racine jusqu'à une feuille) correspondant aux valeurs de D . Si le nouveau produit ne peut être couvert par ces échantillons, il n'y a aucune règle de TR_i correspondant exactement à D . Cependant, nous pouvons toujours trouver une règle de TR_i la plus proche à D . La forme générale de la règle la plus pertinente de TR_i peut être exprimée par

R_{ij} : SI $((D_1 \in v_{1j})$ OU $u_{1j})$ ET ... ET $((D_q \in v_{qj})$ OU $u_{qj})$ ALORS le critère de qualité A_i EST N_{ij}

Où $i \in \{1, \dots, p\}$ et j est le numéro du chemin de l'arbre de décision correspondant à R_{ij} . Les numéros des chemins sur l'arbre de décision, sont définis de haut en bas, et de gauche à droite.

D_1, \dots, D_q désignent les facteurs de conception. v_{1j}, \dots, v_{qj} correspondent aux intervalles ou classes auxquelles les valeurs de D appartiennent sur ce chemin avec $v_{kj} \subset \{M_{k1}, M_{k2}, \dots, M_{kh(k)}\}$. Si le facteur de conception D_k est numérique, v_{kj} est un intervalle continu. Si D_k est linguistique, v_{kj} est une classe comprenant un nombre fini de modalités de D_k . u_{1j}, \dots, u_{qj} sont des valeurs booléennes liées à l'existence des facteurs de conception dans cette règle ($u_{kj}=0$ si D_k apparaît dans la règle sinon $u_{kj} = 1$). N_{ij} représente la modalité du critère de qualité A_i issue de ce chemin. Selon l'algorithme que nous utilisons, cette valeur est linguistique et peut concerner plusieurs classes de A_i avec des différentes probabilités, soit $N_{ij} = \{ \langle C_{i1}, P_{i1j} \rangle, \langle C_{i2}, P_{i2j} \rangle, \dots, \langle C_{ig(i)}, P_{ig(i)j} \rangle \}$, P_{ilj} désigne la probabilité d'appartenance, avec laquelle la valeur du critère de qualité A_i est égale à C_{il} (appelé aussi probabilité de la classe cible, défini par rapport à un cahier des charges) sur le chemin R_{ij} . Pour des différents chemins ou règles extraites de l'arbre de décision, les probabilités associées à chaque classe C_{il} sont différentes. Dans la situation idéale, l'arbre de décision permet de générer uniquement des classes ayant des probabilités 0 et 1, conduisant à une prédiction certaine du critère de qualité.

En pratique, les probabilités sont estimées par les fréquences relatives calculées sur les données d'apprentissage.

La Figure 2.20 montre la structure générale d'un arbre de décision, où les nœuds correspondent aux facteurs de conception et les feuilles à un critère de qualité. Nous associons à chaque nœud ou feuille de l'arbre de décision, les probabilités d'appartenance chacune représentant, pour l'ensemble des échantillons qui entrent dans ce nœud, le taux du nombre d'échantillons appartenant à une classe C_{ij} par rapport au nombre total. Parmi ces probabilités, P_k représente la probabilité de la classe majoritaire (classe comprenant le nombre maximal d'échantillons). P_{ij} représente la probabilité de la classe cible (classe correspondant à la valeur du critère de qualité la plus favorisée par l'utilisateur). A partir de ces probabilités d'appartenance, nous pouvons visualiser intuitivement la répartition des modalités sur chaque nœud ou feuille.

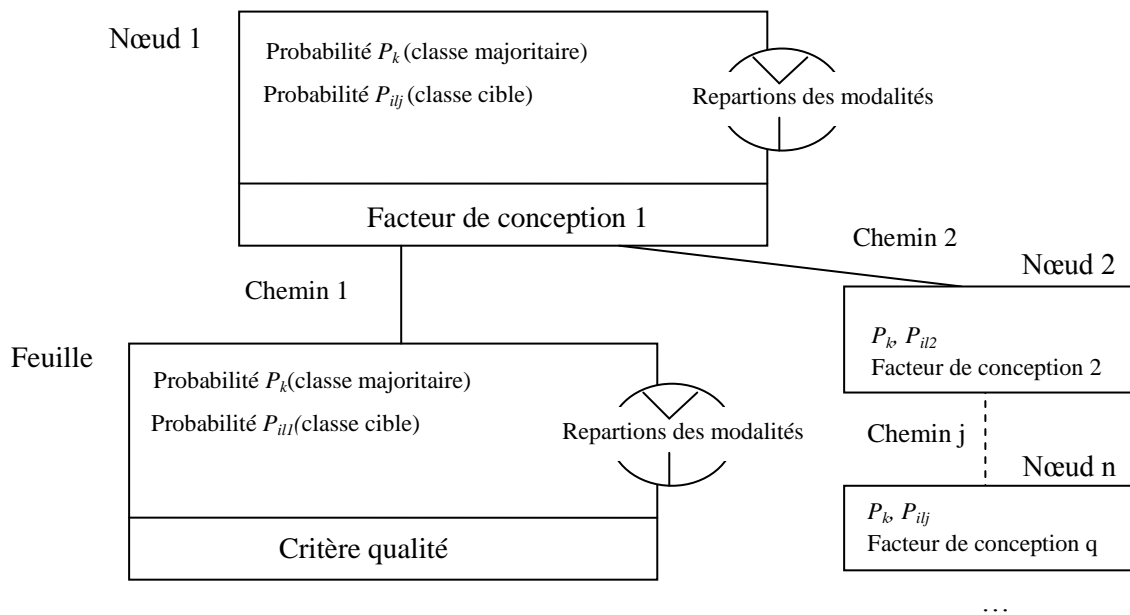


Figure 2. 20. Structure générale d'un arbre de décision refaire

A titre d'exemple, considérons que nous voulons évaluer les performances acoustiques d'une collection de prototypes. Nous avons trois facteurs de conception : D_1 (*type d'aiguille*) qui possède deux valeurs : « feutrer » ou « fourche », D_2 (*densité des matériaux*) et D_3 (*épaisseur des matériaux*) qui sont définis chacun sur un intervalle continu, et un critère de qualité A_1 (*Absorption acoustique*) dont les modalités sont C_1 (*Très acceptable*), C_2 (*Acceptable*), C_3 (*Non acceptable*), définis par l'expert à partir de la fonction d'acceptabilité suivante (Figure 2.21) :

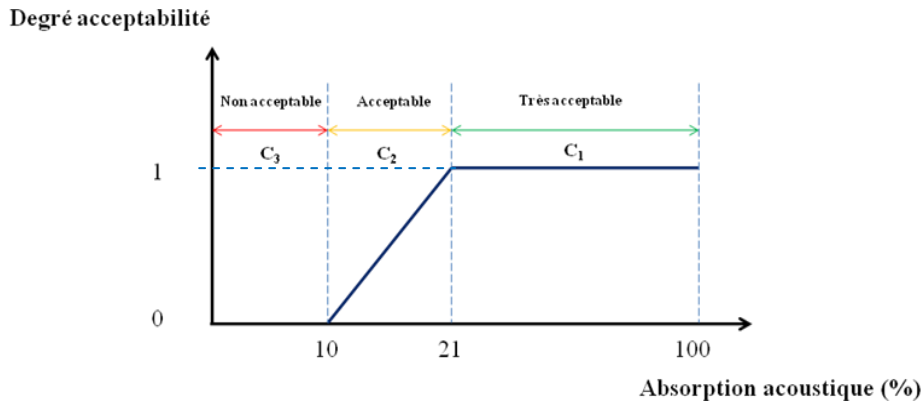
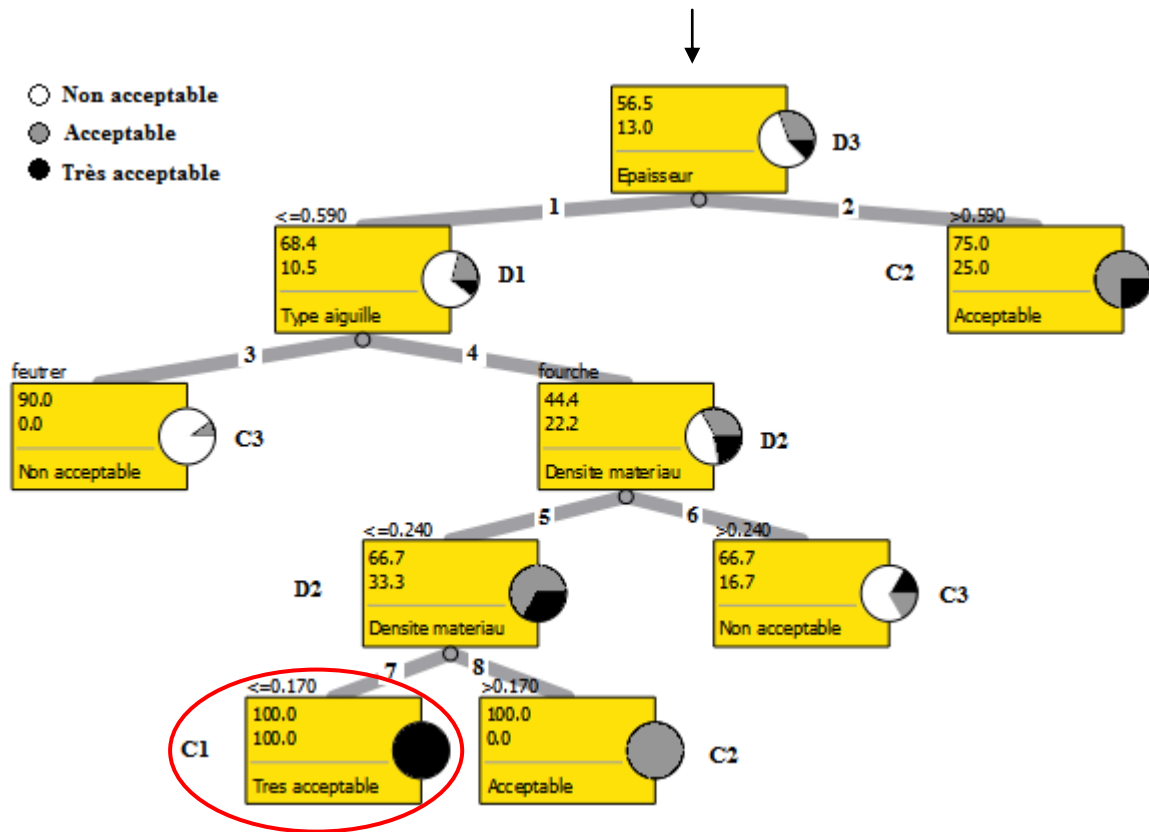


Figure 2. 21. Fonction d'acceptabilité pour le critère qualité « Absorption acoustique »

La Figure 2.22 présente l'arbre de décision généré à partir des données expérimentales de l'étude :



Trois facteurs de conception

D_1 : Type d'aiguille

D_2 : Densité matériau

D_3 : Epaisseur

$C_{ij} \in \{C_1, C_2, C_3\}$ (Critère qualité A_1 : Absorption acoustique) C_1 = Très acceptable, C_2 = Acceptable, C_3 = Non acceptable

Figure 2. 22. Un exemple des règles les plus pertinentes R_{ij} extraites de l'arbre de décision.

Dans cet exemple, les probabilités d'appartenance sont bien affichées sur chaque nœud et chaque feuille. Pour la racine de l'arbre, nous constatons que la probabilité de la classe majoritaire $P_k=56,5\%$, et que la probabilité de la classe cible $P_{ij} = 13,0\%$. Ce principe d'affichage s'applique aussi aux autres nœuds et feuilles.

Dans cet arbre de décision, les règles les plus pertinentes sont :

$$R_{12} : SI (D_3 > 0.59) \text{ ALORS } A_1 \text{ EST } N_{12} = \{ \langle C_1, 25\% \rangle, \langle C_2, 75\% \rangle, \langle C_3, 0\% \rangle \}$$

$$R_{16} : SI (D_3 \leq 0.59) \text{ ET } (D_1 \in \{ \text{fourche} \}) \text{ ET } (D_2 > 0.24) \text{ ALORS } A_1 \text{ EST } N_{16} = \{ \langle C_1, 16.7\% \rangle, \langle C_2, 16.6\% \rangle, \langle C_3, 66.7\% \rangle \}$$

$$R_{17} : SI (D_3 \leq 0.59) \text{ ET } (D_1 \in \{ \text{fourche} \}) \text{ ET } (D_2 \leq 0.17) \text{ ALORS } A_1 \text{ EST } N_{17} = \{ \langle C_1, 100\% \rangle, \langle C_2, 0\% \rangle, \langle C_3, 0\% \rangle \}$$

Dans les règles de décisions générées par l'arbre de la Figure 2.22, D_1 , D_2 et D_3 sont trois facteurs de conception, parmi lesquels D_1 est une variable nominale, D_2 et D_3 numériques. L'objectif ici est de sélectionner les prototypes avec les meilleures performances acoustiques (C_1 (*Très acceptable*)). Ainsi les règles les plus pertinentes pour obtenir les valeurs maximale de l'absorption acoustique sont : R_{12} , R_{16} et R_{17} avec des probabilités d'appartenance pour les classes C_1 , C_2 et C_3 , égale respectivement à : $P_{112}=0.25$, $P_{122}=0.75$, $P_{132}=0$ pour R_{12} / $P_{116}=0.167$, $P_{126}=0.166$, $P_{136}=0.667$ pour R_{16} / $P_{117}=1$, $P_{127}=P_{137}=0$ pour R_{17} .

Quand le nombre des règles de décision est important, nous allons représenter ces règles dans un tableau, pour faciliter leur lecture par les concepteurs. Une interface a été utilisée pour générer ce tableau. Le tableau 2.2 montre un exemple de règles de décision regroupées dans un tableau.

Tableau 2. 2. Exemple de règles de décision regroupées dans un tableau

| Règles de décision | Facteurs de conception | | | | Critères de qualité (Classes) ALORS |
|--------------------|------------------------|-------|-----|-------|--|
| | SI | ET | ... | ET | |
| R_{i1} | D_1 | | | | |
| | | D_2 | | | |
| | | | | | A_1 |
| R_{i2} | | D_3 | | | |
| | | | | D_4 | A_2 |
| R_{i3} | | | | | |
| | | D_5 | | | |
| | | | | | A_3 |
| · · · | | | | | |
| R_{ij} | | | | D_q | A_i |

Les règles de décision du tableau 2.2 seront lues comme suit :

$R_{i1} = SI D_1 ET D_2 ALORS A_1$

$R_{i2} = SI D_1 ET D_3 ET D_4 ALORS A_2$

$R_{i3} = SI D_1 ET D_5 ALORS A_3$

...

$R_{ij} = SI D_1 ET D_5 ET D_q ALORS A_i$

L'arbre de décision nous permet ainsi, de sélectionner les facteurs de conception les plus pertinents, qui sont situés dans les niveaux supérieurs de l'arbre. Plus un facteur de conception D_k est proche de la racine, plus il est pertinent au critère de qualité A_i . Il est possible que plusieurs facteurs de conception se trouvent à un même niveau de l'arbre. Dans cette situation, ils ont le même niveau de pertinence et nous ne classons pas les facteurs de conception au même niveau. L'arbre de décision permet de classer uniquement les facteurs de conception dont les différences sont significatives (classement partiel). Ce traitement devra être plus proche de la réalité que le classement complet de tous les facteurs de conception, proposé dans [Deng, 2008].

L'arbre de décision de la Figure 2.22 nous donne plusieurs informations sur les relations entre les facteurs de conception et le critère de qualité étudié. Tout d'abord, il nous fournit les règles et leur niveau de fiabilité et de pertinence. En fait, les Règles R_{12} , R_{16} et R_{17} sont pertinentes pour obtenir une forte absorption acoustique (C_1). De plus, l'arbre de décision nous indique les paramètres de conception les plus pertinents : « *Epaisseur* » en première position, « *Type d'aiguille* » en second, et « *Densité matériau* » en troisième position. Comme la relation entre les paramètres de conception et le critère de qualité identifié a été établie sur les classes, la précision de ce modèle est faible pour obtenir une qualité précise et certaine. Pour notre exemple nous avons qu'une seule règle certaine ($R_{17}/P_{117}=1$). Ce n'est pas le cas pour ($R_{12}/P_{112}=0.25$) et ($R_{16}/P_{116}=0.16$). C'est pour cette raison que nous avons développé un deuxième modèle (cartes de Kohonen) afin d'obtenir, avec une grande précision, des règles certaines par rapport aux valeurs des facteurs de conception et du critère de qualité. Les cartes de Kohonen seront générées principalement à partir de la connaissance humaine et des données expérimentales.

2.5.2. Modélisation avec les cartes de Kohonen

Etant donnée le nombre élevé de ces paramètres, la visualisation locale au sein de chaque classe peut s'avérer une tâche laborieuse, sensible aux faibles distances entre les données voisines ou aux phénomènes locaux. Dans cette situation, les cartes de Kohonen constituent une solution intéressante pour résoudre les problèmes de représentation et de synthèse au sein de chaque classe. L'un des intérêts de l'algorithme de Kohonen aussi pour la classification est qu'il supporte parfaitement la présence de données manquantes [Ibbou, 1998]. Dans notre situation, les cartes de Kohonen sont principalement générées à partir de la connaissance professionnelle d'un expert, qui est souvent incomplète et imprécise, et mélangée avec les données expérimentales quand la connaissance humaine est très faible. La

dimension ou la taille de la carte est définie par rapport au nombre de données d'entrées, plus les données sont importants, plus la carte est grande, pour avoir une bonne visualisation de la distribution de données. Nous considérons que les observations sont des vecteurs à valeurs réelles de dimension p . Lors de l'introduction d'un vecteur de données incomplet x , nous déterminons d'abord l'ensemble M_x des numéros des composantes manquantes. M_x est un sous ensemble de $\{1, 2, \dots, p\}$. Si (C_1, C_2, \dots, C_n) est l'ensemble des nœuds à cet instant, nous calculons le nœud gagnant $C_{i_0}(x)$ associé à x et sa classe [Cottrell, 1997], en posant

$$i_0(C, x) = \text{Arg min } \|x - C_i\| \quad (2.5)$$

Où la distance $\|x - C_i\|$ est calculée sur les composantes présentes dans le vecteur x .

L'utilisation des vecteurs avec les données manquantes peut se réaliser de deux manières différentes. Si nous souhaitons les utiliser au moment de la construction des vecteurs-codes, à chaque étape, une fois que nous déterminons le numéro de l'unité gagnante, la mise à jour des vecteurs codes (le gagnant et ses voisins) ne porte que sur les composantes existant dans le vecteur. Nous pouvons aussi se contenter de classer, après construction de la carte, les vecteurs incomplets en les affectant dans la classe dont le vecteur code est le plus proche, au sens de la distance restreinte aux composantes présentes. Pour simplifier la modélisation, nous avons utilisé la deuxième démarche.

Pour interpréter maintenant la connaissance des experts selon des variables qualitatives non utilisées dans l'algorithme de Kohonen, nous avons étudié la répartition de chaque connaissance en modalités. Après avoir calculé avec les méthodes classiques de statistiques pour chaque connaissance, nous pouvons dessiner à l'intérieur de chaque unité, une cellule pour les facteurs de conception, correspondant à un nœud de l'arbre de décision, et un cercle pour les modalités d'un critère de qualité (Figure 2.23). Ceci permet de montrer comment sont réparties les modalités de chacune des variables, correspondant à une feuille de l'arbre de décision, la taille du cercle représente le nombre d'instance pour chaque modalité du critère de qualité, et la couleur de la cellule la variation des modalités des facteurs de conception (plus la couleur est foncé, plus la valeur est importante pour les variables numériques).

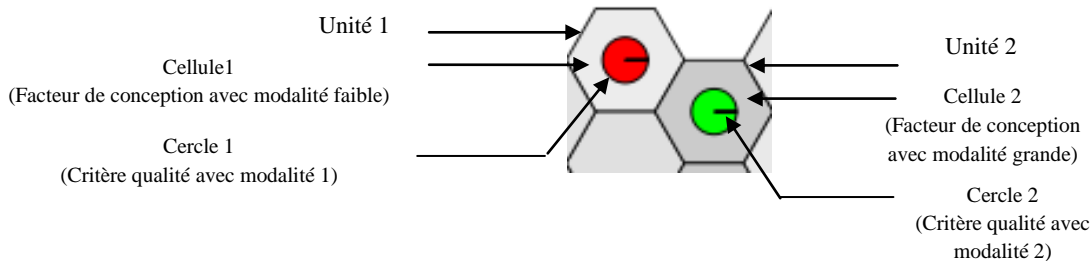


Figure 2. 23. Deux unités d'une carte de Kohonen

Le voisinage des unités va nous permettre de délimiter avec précision les intervalles de variation des facteurs de conception pour chaque modalité du critère de qualité, pour déterminer les espaces de fonctionnement les plus pertinents, ainsi il est plus facile de délimiter ces espaces, quand les cellules représentent des variables qualitatives.

Rappelons que les variables qualitatives ne peuvent pas être utilisées telles quelles, même lorsque les modalités sont codées par des nombres. S'il n'existe pas de relation d'ordre sur les codes (1 pour aiguille fourche, 2 pour aiguille conique, etc.), cela n'a aucun sens de les utiliser comme des variables numériques pour faire un apprentissage de Kohonen. Même si les codes correspondent à une progression croissante ou décroissante, cela n'aurait un sens que si une échelle linéaire était utilisée (la modalité 2 correspondant à la moitié de la progression entre la modalité 1 et 3). Ainsi, afin de simplifier la tâche aux concepteurs, nous avons défini trois modalités pour chaque variable : petit, moyen, grand. Par exemple pour un critère de qualité « *Absorption acoustique* », nous aurons trois modalités *ACSI*, *ACS2*, *ACS3* correspondant respectivement à, faible, moyenne et forte valeurs d'absorption acoustique.

Le tableau 2.3 présente une formalisation de la connaissance humaine. Où le principe consiste à combiner plusieurs facteurs de conception pour chaque conséquence correspondant à un critère de qualité.

Tableau 2. 3 Formalisation de la connaissance humaine

| Connaissance de l'expert | Conséquence : Critères de qualité A_i | Conditions : Facteurs de conception | | |
|--------------------------|---|-------------------------------------|-----|-------|
| | | D_1 | ... | D_q |
| <i>Regle₁</i> | | | | |
| ⋮ | | | | |
| <i>Regle_n</i> | | | | |

Le tableau 2.3 peut être interprété selon les deux règles suivantes :

Pour la règle j ($j \in \{1, 2, \dots\}$), nous avons :

SI ($(D_1 \in x_{1j})$ *OU* w_{1j}) *ET* ... *ET* ($(D_q \in x_{qj})$ *OU* w_{qj}), *ALORS* le critère de qualité A_i *EST* y_{ij}

x_{1j}, \dots, x_{qj} correspondent chacune à une modalité d'un facteur de conception, soit $x_{kj} \in \{M_{k1}, M_{k2}, \dots, M_{kh(k)}\}$. w_{1j}, \dots, w_{qj} sont des valeurs booléennes liées à l'existence des paramètres de conception dans cette règle ($w_{kj} = 0$ si D_k apparaît dans la règle sinon $w_{kj} = 1$). y_{ij} représente la classe ou modalité du critère de qualité A_i issue de cette règle, soit $y_{ij} \in \{C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{ig(i)}\}$.

Nous effectuons ensuite une classification classique de Kohonen sur chaque facteur de conception par application de l'algorithme KDISJ (tableau disjonctif complet de Kohonen) [Cottrell, 1997]. Nous considérons ici que le tableau disjonctif complet, noté D , contient toute l'information permettant de connaître aussi bien les individus que la répartition des modalités. Nous notons d_{ij} le terme général de ce tableau qui peut être considéré comme un tableau de

contingence croisant la variable "individu" à N modalités et la variable "modalités" à M modalités. Le terme d_{ij} prend ses valeurs dans $\{0,1\}$.

De manière à utiliser la distance du χ^2 sur les lignes autant que sur les colonnes, et pour pondérer les modalités de façon proportionnelle à leurs effectifs, nous corrigeons le tableau disjonctif complet, et nous posons

$$d_{ij}^c = \frac{d_{ij}}{\sqrt{d_i d_j}} \quad (2.6)$$

$$\text{Où } d_i = \sum_{j=1}^M d_{ij} \text{ et } d_j = \sum_{i=1}^N d_{ij} \quad (2.7)$$

Nous choisissons ensuite une carte de Kohonen, et nous associons à chaque unité u un vecteur code C_u formé de $(M + N)$ composantes, les M premières évoluent dans l'espace des individus (représentés par les lignes de D), les N dernières dans l'espace des modalités (représentées par les colonnes de D).

Nous pratiquons ainsi un classement classique de Kohonen sur les individus, un autre sur les modalités, tout en les maintenant associés. Après convergence, les individus et les modalités sont classés dans les classes de Kohonen. Des individus ou modalités « proches » sont classés dans la même classe ou dans des classes voisines. Il suffit en général de faire $15(M+N)$ itérations pour obtenir la convergence.

Cet algorithme de classification permet de générer une carte de Kohonen pour chaque facteur de conception. Sur cette carte, chaque règle de l'expert est représentée par une unité, et l'ensemble des règles est regroupé par rapport à la proximité des modalités de ce facteur de conception. De plus, les modalités du critère de qualité sont labellisées sur cette carte. Après la convergence de l'algorithme, chaque cellule se trouve dans une place relativement optimale sur la carte de Kohonen.

Sur une carte de Kohonen, les cellules peuvent être utilisées pour décrire la répartition des modalités du facteur de conception correspondant, et les cercles correspondent à la répartition des modalités du critère de qualité. Si nous reprenons maintenant l'exemple de l'étude d'absorption acoustique pour raffiner les règles de décision la plus pertinentes R_{ij} , nous devons d'abord présenter les modalités des facteurs de conception et des critères de qualité (tableau 2.4), et formaliser une règle de la connaissance humaine fournis par les experts (tableau 2.5).

Tableau 2. 4. Découpage des variables en modalités uniforme

| Variables | Modalités | Notations |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------|
| X_1 : Type d'aiguille | Feutrer, Fourche | Feutrer, Fourche |
| X_2 : Densité matériau | <0.1, [0.1, 0.4], >=0.4 | $DST1, DST2, DST3$ |
| X_3 : Epaisseur | <0.1, [0.1, 0.9], >=0.9 | $EPS1, EPS2, EPS3$ |
| Y_1 : Absorption acoustique | [0, 0.3], [0.3, 0.7], [0.7, 1] | $ACS1, ACS2, ACS3$ |

Tableau 2. 5. Représentation d'une connaissance humaine

| Nom expert | Type d'aiguille | Epaisseur | Densité matériau | Absorption acoustique |
|------------|-----------------|-----------|------------------|-----------------------|
| Expert 1 | Fourche | EPS3 | DST2 | ACS3 |
| Expert 1 | - | EPS3 | - | ACS3 |

Afin d'obtenir la valeur maximale de la variable de sortie $Y_1 = \max(\text{absorption acoustique})$, et être plus précis sur les valeurs des facteurs de conception, au lieu de proposer un intervalle sur les modalités, nous allons raffiner les règles de l'arbre de décision les plus pertinentes R_{ij} obtenu précédemment :

$$R_{12} : SI (D_3 > 0.59) \text{ ALORS } A_1 \text{ EST } N_{12} = \{ \langle C_1, 25\% \rangle, \langle C_2, 75\% \rangle, \langle C_3, 0\% \rangle \}$$

$$R_{16} : SI (D_3 \leq 0.59) \text{ ET } (D_1 \in \{ \text{fourche} \}) \text{ ET } (D_2 > 0.24) \text{ ALORS } A_1 \text{ EST } N_{16} = \{ \langle C_1, 16.7\% \rangle, \langle C_2, 16.6\% \rangle, \langle C_3, 66.7\% \rangle \}$$

$$R_{17} : SI (D_3 \leq 0.59) \text{ ET } (D_1 \in \{ \text{fourche} \}) \text{ ET } (D_2 \leq 0.17) \text{ ALORS } A_1 \text{ EST } N_{17} = \{ \langle C_1, 100\% \rangle, \langle C_2, 0\% \rangle, \langle C_3, 0\% \rangle \}$$

Pour cela nous avons appliqué le deuxième modèle de carte de Kohonen (Figure 2.24), pour présenter la répartition des modalités des facteurs de conception par rapport au critère qualité « Absorption acoustique » défini sur 3 niveaux : petit (rouge), moyenne (bleu) et grande (vert). La Figure 2.24 présente la carte de Kohonen, pour le facteur de conception « Epaisseur » par rapport au critère qualité « Absorption acoustique ». Selon la carte de Kohonen, l'Unité 1, Unité 2 et Unité 3, présentent les valeurs maximales de l'absorption acoustique, pour ces unités, les valeurs des facteurs de conception associées sont données comme suit : Type aiguille $\in \{ \text{feutrer} \}$, Densité = 0.17, Epaisseur = 0.77 pour Unité 1, Type aiguille $\in \{ \text{fourche} \}$, Densité = 0.89, Epaisseur = 0.29 pour Unité 2, et Type aiguille $\in \{ \text{fourche} \}$, Densité = 0.17, Epaisseur = 0.38 pour Unité 3.

A partir de ces valeurs, nous pouvons raffiner les trois règles précédentes R_{12} , R_{16} , R_{17} de l'arbre de décision car les conditions de ces trois règles sont conformes respectivement à l'Unité 1, Unité 2 et Unité 3. Les unités voisines de ces dernières, vont nous permettre de délimiter les intervalles pour obtenir la valeur maximale de l'absorption acoustique. Nous obtenons donc :

$$R_{12} : SI (D_3 \subset \{ 0.72, 0.77 \}) \text{ ET } (D_1 \in \{ \text{feutrer} \}) \text{ ET } (D_2 \subset \{ 0.17, 0.23 \}) \text{ ALORS } A_1 \text{ EST } N_{12} = \{ \langle C_1, 100\% \rangle, \langle C_2, 0\% \rangle, \langle C_3, 0\% \rangle \}$$

$$R_{16} : SI (D_3 \subset \{ 0.29, 0.59 \}) \text{ ET } (D_1 \in \{ \text{fourche} \}) \text{ ET } (D_2 \subset \{ 0.25, 0.89 \}) \text{ ALORS } A_1 \text{ EST } N_{16} = \{ \langle C_1, 100\% \rangle, \langle C_2, 0\% \rangle, \langle C_3, 0\% \rangle \}$$

$$R_{17} : SI (D_3 \subset \{ 0.38, 0.59 \}) \text{ ET } (D_1 \in \{ \text{fourche} \}) \text{ ET } (D_2 \subset \{ 0.17, 0.89 \}) \text{ ALORS } A_1 \text{ EST } N_{17} = \{ \langle C_1, 100\% \rangle, \langle C_2, 0\% \rangle, \langle C_3, 0\% \rangle \}$$

Nous pouvons fusionner les deux règles R_{16} et R_{17} pour avoir une nouvelle règle, que nous allons nommer R_{16-7} : $SI (D_3 \subset \{0.29, 0.59\}) ET (D_1 \in \{fourche\}) ET (D_2 \subset \{0.17, 0.89\})$ ALORS $A_1 EST N_{17} = \{<C_1, 100\%>, <C_2, 0\%>, <C_3, 0\%>\}$

Ainsi les deux règles les plus pertinentes sont R_{12} et R_{16-7} .

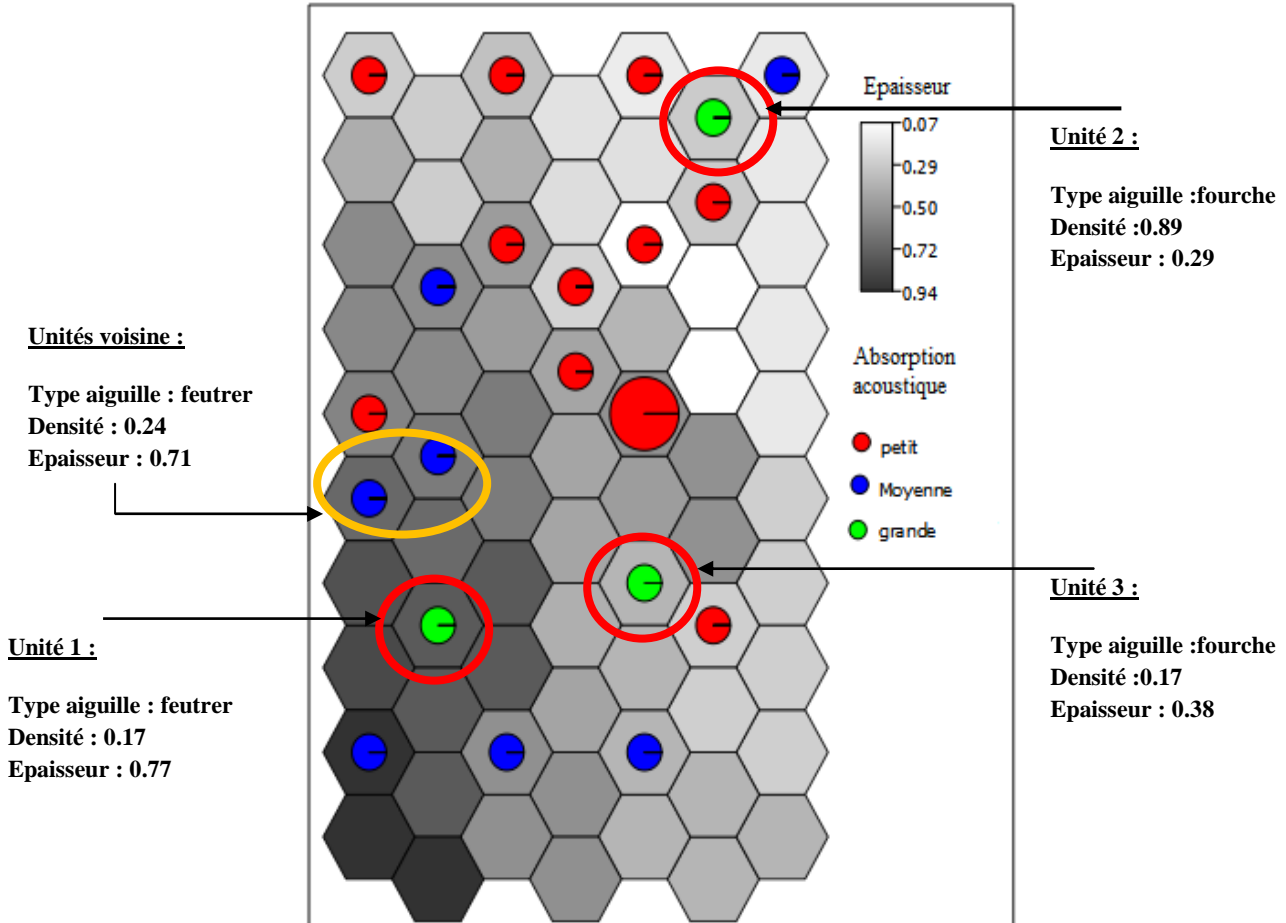


Figure 2. 24. Exemple d'une carte de Kohonen, pour le facteur de conception « Epaisseur » par rapport au critère qualité « Absorption acoustique »

Une autre forme de présentation de la carte de Kohonen est proposée, pour encore simplifier la lecture de la carte, en triant les cellules, par rapport aux facteurs de conception, afin d'extraire plus facilement d'autres informations de la carte. La Figure 2.25 présente la nouvelle présentation de la carte de la Figure 2.24, en triant les cellules du facteur de conception « Epaisseur » par rapport au type d'aiguille.

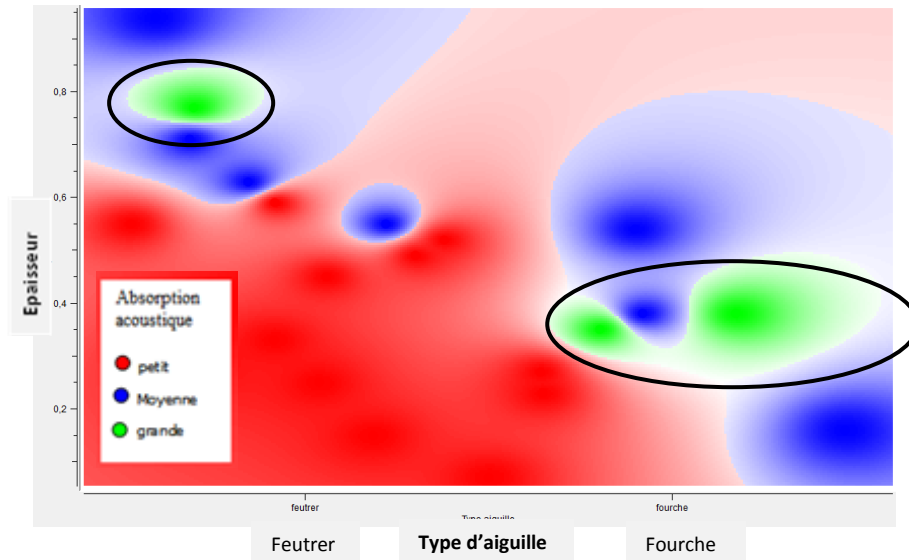


Figure 2. 25. Carte de Kohonen obtenue après le tri des cellules par rapport aux facteurs de conception : « Epaisseur » en fonction « type d'aiguille »

Un exemple d'information qui peut être obtenu à partir de la carte de la Figure 2.25, est que les aiguilles de type fourche donnent de bonne performance acoustique (zone vert) avec des valeurs d'épaisseur faible (inférieur à 0.6 mm), contrairement aux aiguilles de type feutrer (épaisseur supérieur à 0.7 mm).

Afin d'évaluer la performance des deux modèles, soit l'arbre de décision et la carte de Kohonen (SOM), nous avons tracé la courbe ROC associé à chaque modèle (Figure 2.26), et calculer l'indicateur aire sous la courbe (Area Under the Curve AUC). Les résultats obtenus sont assez satisfaisants (0.61 pour l'arbre de décision et 0.71 pour la carte de Kohonen). Evidemment, les résultats de la carte de Kohonen, issus du raffinement des règles les plus pertinentes de l'arbre de décision, sont plus précis (plus proches de 1) que l'arbre de décision original.

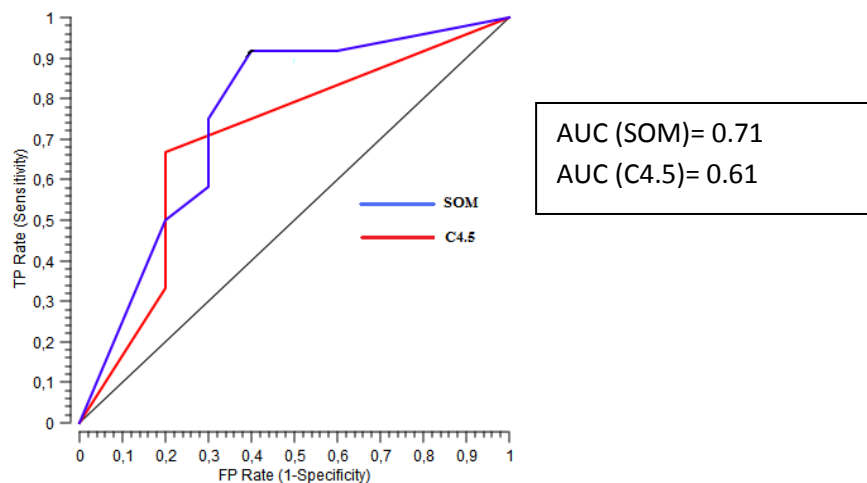


Figure 2. 26. Courbe ROC pour les deux modèles Arbre de décision (C4.5) et carte de Kohonen (SOM)

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un nouveau système d'aide à la conception industrielle, basé sur les méthodes de calculs intelligents, pour développement de nouveaux matériaux multifonctionnels. Dans ce système, langage UML et la programmation orientée objet sont utilisés comme support informatique afin d'organiser les différents modules fonctionnels, soit les données d'apprentissage, les interfaces et les contrôles. L'utilisateur effectue essentiellement le traitement sur ces deux derniers. Ainsi mieux résoudre les problèmes rencontrés dans le développement d'outils d'aide à la conception, notamment le traitement de variables qualitatives, et la formalisation de la connaissance humaine, nous nous proposons d'appliquer de nouvelles méthodes, soit les arbres de décision, les cartes de Kohonen et la logique floue.

Le système proposé est composé de trois outils d'aide à la conception, pour contrôler le processus de développement de nouveaux procédés et de nouveaux produits textiles ou composites. Le premier outil est la sélection des facteurs de conception les plus pertinents, qui a pour principal objectif l'identification des paramètres pertinents du procédé et de la structure du matériau étudié selon les propriétés fonctionnelles souhaitées. Le deuxième outil est la détermination de zones de fonctionnement, afin de déterminer les conditions de fabrication qui répondent aux spécifications définies dans le cahier des charges. Enfin le dernier outil est l'évaluation globale des prototypes réalisés, pour comprendre le comportement du matériau dans le but de l'optimiser et d'avoir une vision globale des performances des produits développés selon l'ensemble des critères de qualité et les propriétés fonctionnelles souhaitées. Afin d'évaluer et tester la performance du système développé sur des vrais cas d'étude, nous allons d'abord l'appliquer à la maîtrise d'un procédé textile de renfort par aiguilletage, puis au développement de matériaux biocomposites. Les détails de ces applications et les analyses de ces résultats seront présentés dans le Chapitre 3 et le Chapitre 4.

Chapitre 3 - Application à la maîtrise de procédé: étude du transfert de fibres dans un procédé d'assemblage de structures nontissées par aiguilletage

3.1. Introduction

Dans ce chapitre l'objectif principal consiste en l'étude d'un procédé d'aiguilletage à l'aide du système d'aide à la conception présenté dans le chapitre 2. Ce travail a été étendu au développement d'un nouveau procédé d'aiguilletage mais ne sera pas présenté ici pour des raisons de confidentialité. Nous cherchons ici à montrer l'intérêt et à valider nos outils au travers un procédé éprouvé mais toutefois complexe : le procédé d'aiguilletage. Nous étudierons l'influence des paramètres d'aiguilletage appliqués à des structures nontissées bicouches afin d'extraire des informations sur le comportement des aiguilles en fonction des différentes natures de fibres utilisées pour les matériaux textiles ou composites. Cette étude s'est conduite sur un procédé d'aiguilletage classique (angle d'aiguilletage fixé à 90°, sans séparation entre les couches). L'analyse est réalisée grâce au nouveau modèle et au système d'aide à la conception présenté dans le chapitre 2 pour le développement de nouveau procédé d'aiguilletage, comme par exemple la prise en charge des angles d'attaque lors du processus d'aiguilletage.

Dans ce chapitre, l'objectif de l'étude consiste aussi à analyser la qualité et la quantité de transfert des fibres d'une couche à une autre dans une structure bicouche obtenue par aiguilletage. Cette étude nous permettra d'optimiser les facteurs de développement du procédé en choisissant les bonnes aiguilles et de comprendre leurs comportements et leurs compatibilités en fonction des fibres, ce qui présente un point important pour les applications textiles et composites. L'application du modèle nous permettra aussi d'étudier les relations performance renfort/paramètres et procédé/structure des nontissés et des relations performance procédé/paramètres et procédé/structure des nontissés. Pour cela plusieurs paramètres ont été étudiés :

- Le type de fibre (nature, finesse, mélange...)
- Le type d'aiguille (forme de la section de la partie travaillante, nombre de barbes, géométrie des barbes...)
- Les paramètres du procédé d'aiguilletage (profondeur de pénétration, pas d'avance...)

3.2. Description des matériaux utilisés : Les nontissés aiguilletés

3.2.1. Définition

Selon les normes ISO 9092 et DIN EN 29092 [AFNOR, 1988],[AFNOR, 1992], le nontissé est "une feuille manufacturée, constituée d'un voile ou d'une nappe de fibres ou filaments orientés directionnellement ou au hasard, liées par friction et/ou cohésion, et/ou adhésion, à l'exclusion du papier et des produits obtenus par tissages, tricotages, tuftages, couturages incorporant des fils ou filaments de liage ou feutrés par foulage humide, qu'ils soient ou non aiguilletés". La fibre et le filament sont des structures linéaires textiles respectivement de longueur finie et infinie.

Le nontissé peut être caractérisé par ses paramètres de structures. Parmi ces paramètres nous pouvons citer : masse surfacique, épaisseur, densité massique, porosité, perméabilité à l'air, diamètre des fibres, densité des fibres, etc. Ces paramètres ont une influence significative sur les propriétés fonctionnelles des nontissés telle que : l'absorption acoustique, la filtration, les propriétés mécaniques, etc. [EDANA, 2008]. Ils permettent donc de contrôler la qualité finale du produit désiré ainsi que ses domaines d'application.

3.2.2. Procédé d'aiguilletage

Il existe trois procédés fondamentaux pour la formation de voiles pour les nontissés: La voie sèche, la voie fondue et la voie humide [Coste, 2004]. La consolidation des voiles a pour objectif de lier les fibres/filaments entre eux. Il existe trois techniques principales [Coste, 2004] : La consolidation chimique, la consolidation thermique et la consolidation mécanique (aiguilletage et hydroliage). Dans cette étude nous allons travailler en voie sèche, formation de voile par cardage, puis d'une nappe à l'aide d'un étaleur-nappeur. Cette nappe sera consolidée par aiguilletage.

3.2.2.1. Définition

Le procédé d'aiguilletage est l'enchevêtrement physique des fibres grâce à l'action d'aiguilles. Le passage des aiguilles perpendiculairement à la nappe entraîne profondément les fibres au sein de la structure fibreuse. L'aiguilleteuse est équipée d'une planche où sont insérées une multitude d'aiguilles métalliques (Figure 3.1), garnies de barbes spécialement conçues pour le transfert de fibres. Ces planches ont un mouvement de translation alternative qui permet aux aiguilles de traverser les structures fibreuses nontissées (Figure 3.2).



Figure 3. 1. Machine d'aiguilletage

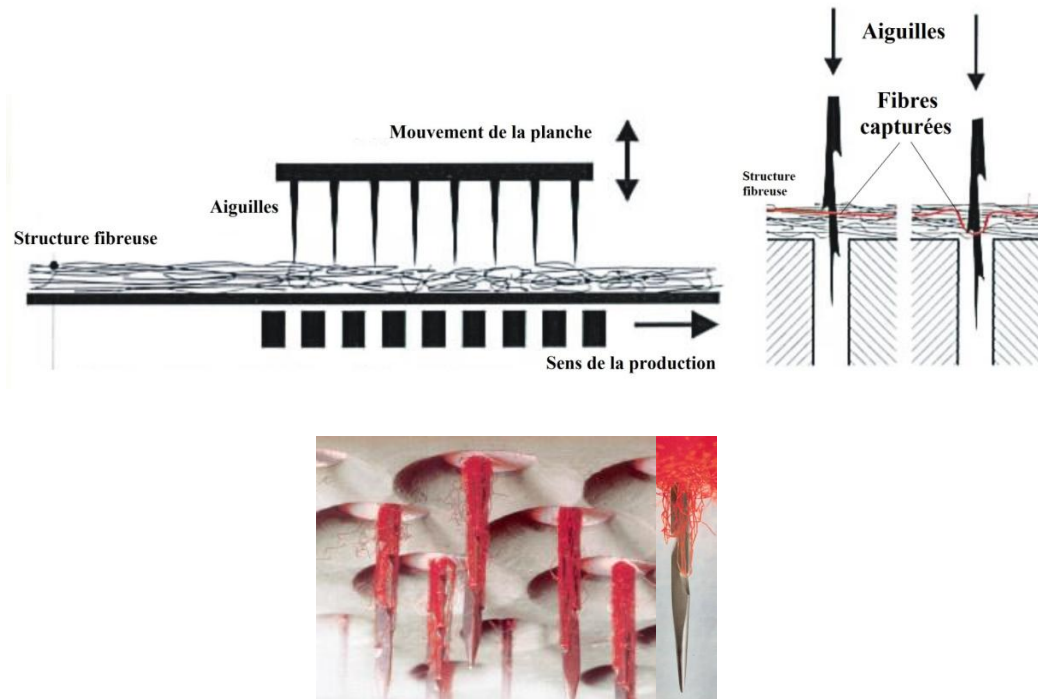


Figure 3. 2. Schéma de principe d'aiguilletage à 90° (capture des fibres par les aiguilles)
[Wollimex, 2011][Foster, 1990]

Les aiguilles sont composées d'une partie travaillante constituée de petites encoches, appelées barbes, qui assurent le transport des fibres. Il existe plusieurs types d'aiguilles, choisies notamment en fonction de la fibre et de l'application finale du matériau. En réglant quelques paramètres sur l'aiguilleteuse, tel que la pénétration des aiguilles, nous pouvons faire varier le nombre de barbes travaillantes, c'est-à-dire qui vont effectivement entrainer les fibres. D'une manière générale, plus les aiguilles pénétreront dans la structure, plus les fibres seront enchevêtrées. La Figure 3.3 représente un exemple d'aiguille conventionnelle. Ce type d'aiguille se nomme aiguille à feutrer.

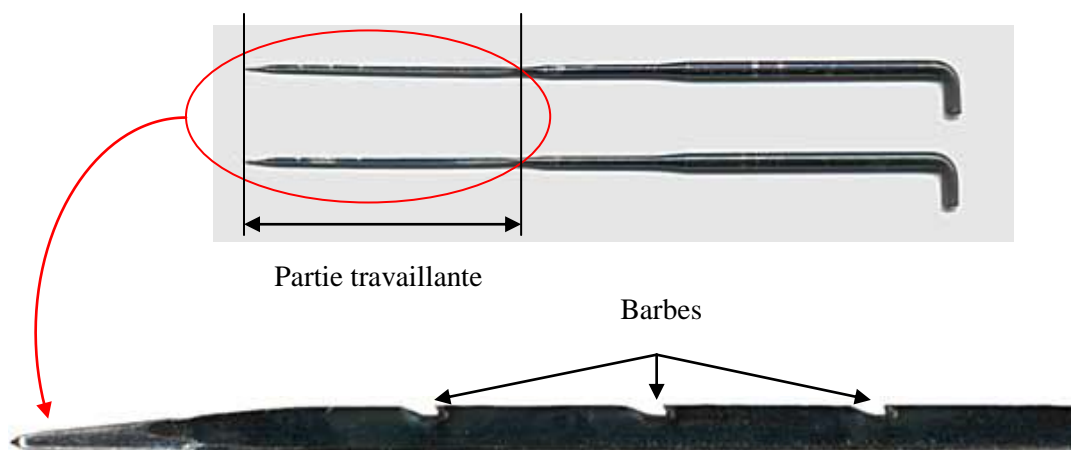


Figure 3. 3. Aiguille à feutrer conventionnelle pour aiguilletage

Il existe actuellement deux grands fabricants d'aiguilles sur le marché, Foster® et Groz-Beckert®. Une aiguille est définie par plusieurs caractéristiques, comme le type d'aiguille (à feutrer, à couronne, à fourche, à goutte...), le nombre de barbes par arête, la profondeur des barbes, la forme de section de l'aiguille, la finesse de la partie travaillante (la jauge), etc. La Figure 3.4 montre quelques aiguilles utilisées dans l'industrie des nontissés, dont nous imaginons l'influence de la forme des aiguilles (section) et de la partie travaillante sur le processus d'aiguilletage.

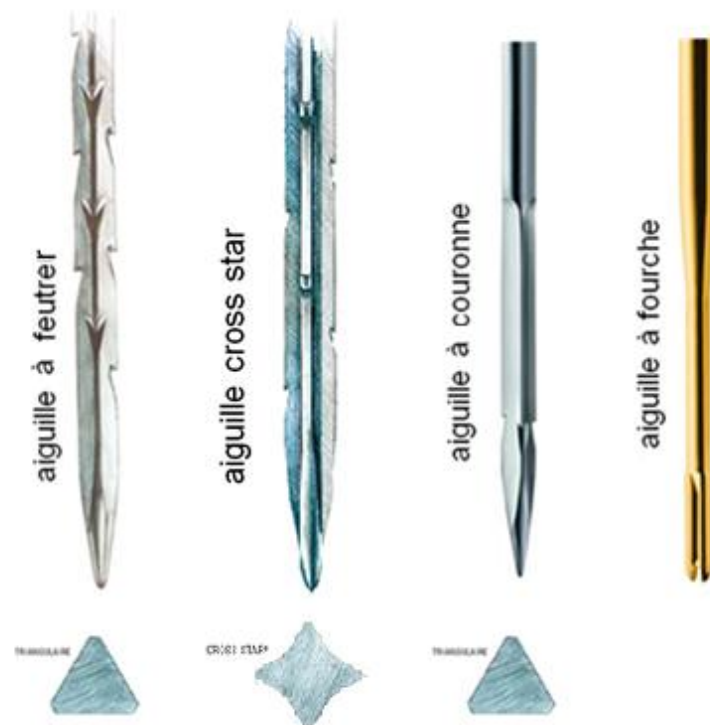


Figure 3. 4. Différents types d'aiguilles pour l'industrie des nontissés [GrozBeckert, 2005]

Les aiguilles présentées dans la Figure 3.4 se différencient notamment par la géométrie et la disposition des barbes qui influence fondamentalement sur le processus de transfert des fibres : barbes situées sur une seule arête, distance entre la pointe de l'aiguille et la première barbe, distance entre les barbes, forme de la barbe, forme de la section de la partie travaillante, etc.

3.2.2.2. Présentation de la ligne de fabrication cardage et aiguilletage

La Figure 3.5 montre la ligne pilote utilisée pour le processus de fabrication des nontissés qui vont ensuite être assemblés en structure bicouche. Cette ligne est composée d'une chargeuse-ouvreuse (séparation des faisceaux de fibres), d'un système d'alimentation de carte, d'une carte (formation du voile de fibres), d'un étaleur-nappeur (superposition des voiles afin d'atteindre une masse surfacique suffisante et formation d'une nappe) et d'une

aiguilleteuse dédiée ici au pré-aiguilletage (pré-consolidation, compactage de la nappe) du nontissé et d'un enrouleur.

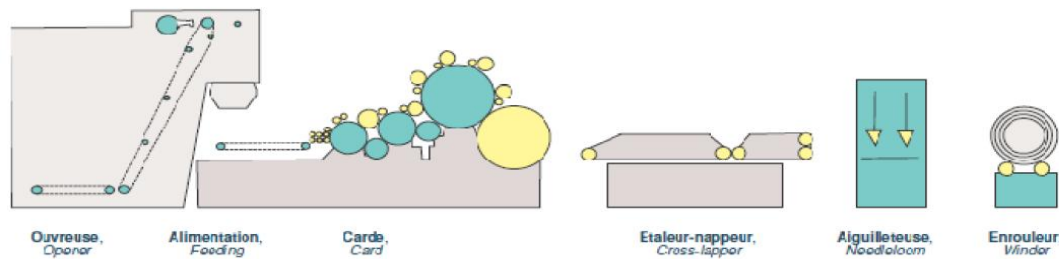


Figure 3. 5. Ligne voie sèche cardé/aiguilleté

La Figure 3.6 montre le processus d'assemblage par aiguilletage des structures nontissées bicouche. Nous superposons deux couches de nontissés réalisés précédemment sur lesquelles nous appliquons un aiguilletage perpendiculaire. Nous réalisons dans ce cas un enchevêtrement physique des fibres constituant les voiles avec un angle d'attaque de 90° par rapport au nontissé.

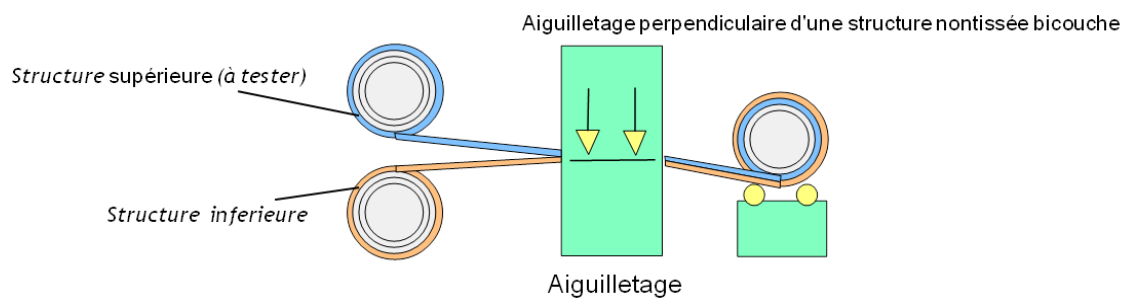


Figure 3. 6. Assemblage par aiguilletage perpendiculaire des nontissés bicouche

3.2.3. Principaux paramètres d'aiguilletage

Dans un procédé d'aiguilletage il existe un nombre important de paramètres qui influencent la qualité de transfert des fibres. La Figure 3.7 montre un certain nombre de ces paramètres. Nous trouvons des paramètres liés à la matière première, comme la nature de la fibre, la longueur de fibre, la finesse de fibre, etc. ; des paramètres liés au procédé, comme le type d'aiguille, la profondeur de pénétration, le pas d'avance, la densité d'aiguilletage, etc. ; Ou encore des paramètres liés à la structure fibreuse, comme la masse surfacique, l'épaisseur, la longueur surfacique ou densité de fibres, etc.

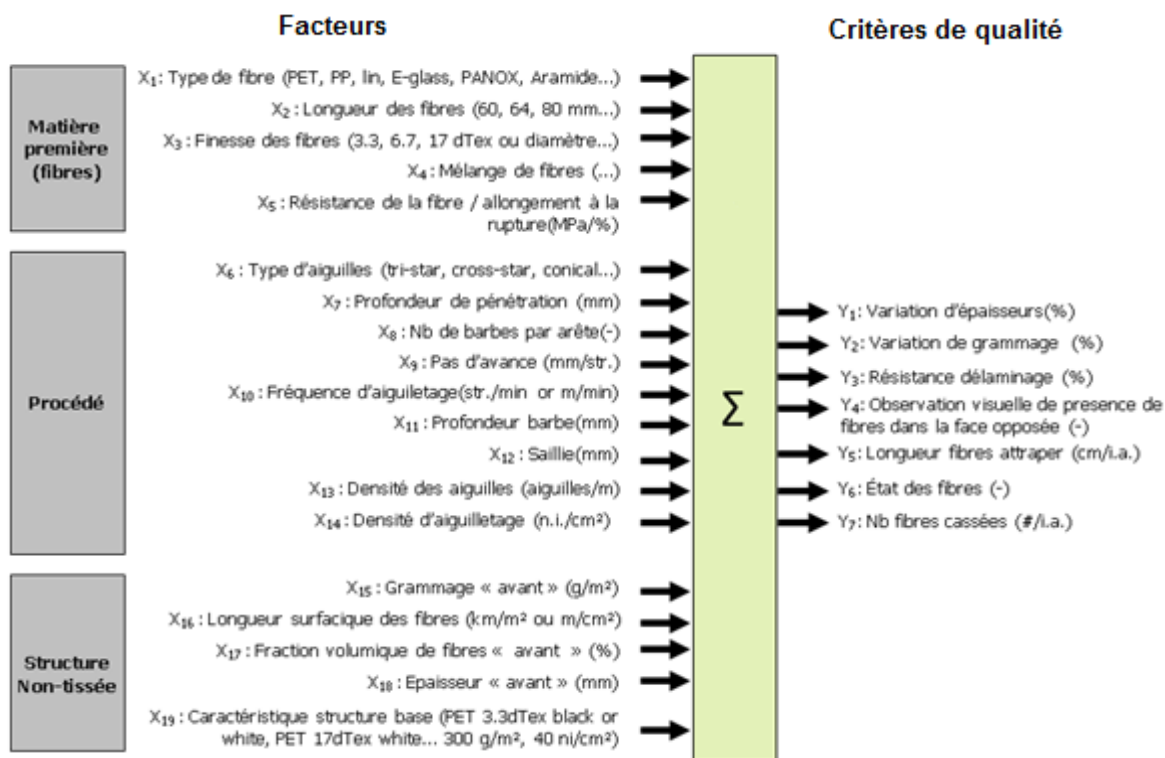


Figure 3. 7. Identification de paramètres d'aiguilletage (facteurs) qui influencent la qualité de transfert des fibres (critères qualités)

La Figure 3.7 montre la complexité de l'étude pour la maîtrise du procédé d'aiguilletage. Et cela est dû principalement, d'une part à la multitude des facteurs d'influence considérés ici comme variables d'entrée du modèle, et d'autre part au nombre de critères qualité pris en compte, considérés comme variables de sortie du modèle choisis pour évaluer la qualité de transfert des fibres d'une couche à l'autre de la structure fibreuse à assembler. Nous constatons aussi d'après le modèle qu'il existe des valeurs qualitatives au niveau des facteurs de conception ainsi que pour les critères qualité, tels que par exemple : « *le type de fibre* », « *le type d'aiguille* », « *la configuration d'aiguilletage* », « *l'observation visuelle* », etc. Les méthodes classiques d'analyse sont généralement basées sur le traitement numérique de données et donc moins adaptées au traitement de données qualitatives. Et il n'est pas toujours facile ou possible de transformer les variables qualitatives en variables quantitatives.

La complexité du modèle réside aussi dans la relation entre les facteurs de conception et les critères de qualité qui est fortement non linéaire. Par exemple, deux fibres de nature différente et de même morphologie n'ont pas nécessairement le même comportement à l'aiguilletage.

Nous allons dans ce qui suit présenter les deux études de cas consacrées à la modélisation pour l'aide au fonctionnement et à la mise au point d'un nouveau procédé d'aiguilletage, pour cela deux études ont été réalisées. La première consiste à étudier la relation entre les fibres et les aiguilles utilisées, pour assurer un meilleur transfert des fibres

lors du processus d'aiguilletage. La deuxième étude est consacrée à l'estimation quantitative des fibres transportées par le procédé d'aiguilletage.

3.3. Etude de l'association type de fibre / type d'aiguille

Dans la littérature, il existe quelques techniques pour modéliser le transfert de fibres pendant l'opération d'aiguilletage, notamment des techniques expérimentales ou des modèles analytiques. La Figure 3.8 montre les principales techniques de modélisation utilisées pour l'étude du transfert de fibre dans un procédé d'aiguilletage.

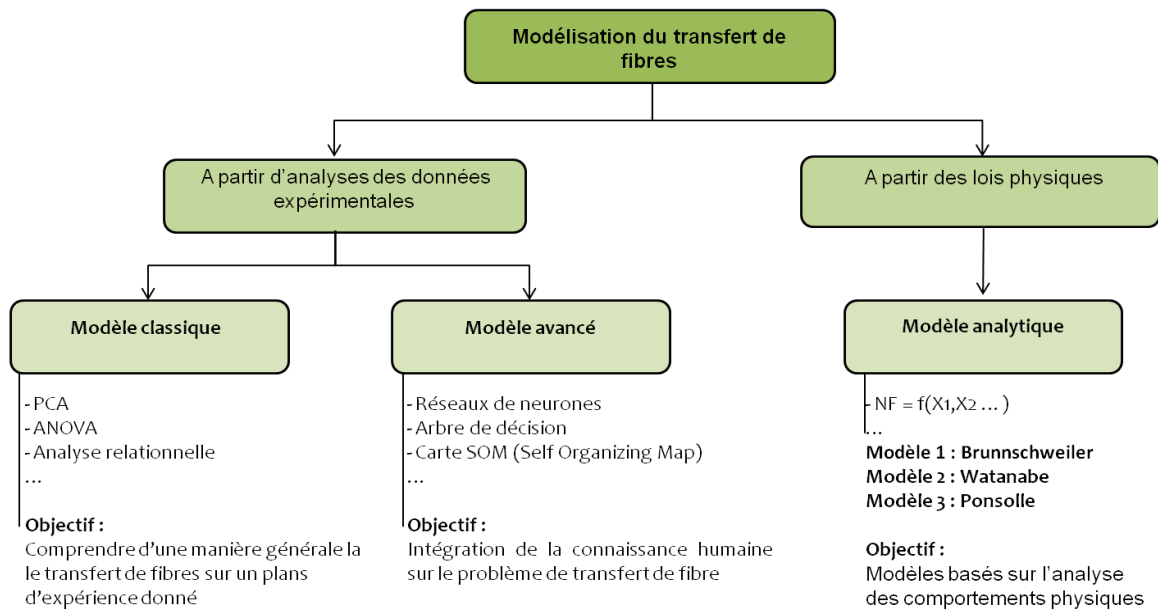


Figure 3. 8. Techniques de modélisation utilisées ou proposées pour modéliser le transfert de fibres pendant l'opération d'aiguilletage

Afin d'étudier le comportement d'aiguilles en termes de transfert de fibres, un plan d'expériences est défini, avec notamment une sélection de structures nontissées contenant différents types de fibres. Plusieurs paramètres, tels que le type de fibre, type d'aiguille, la profondeur de pénétration et le pas d'avance, peuvent influencer sur les caractéristiques du produit final. Un certain nombre d'aiguilles ont été sélectionnées selon la connaissance des experts (à feutrer conventionnelle, à feutrer cross-star, à fourche, à couronne...). Puis des paramètres d'aiguilletage sont définis afin de tester ces aiguilles dans différentes conditions d'aiguilletage où nous pourrions étudier leur comportement. Ainsi, parmi ces conditions, nous ferons varier la densité d'aiguilletage (le pas d'avance) et la profondeur de pénétration. Une nouvelle méthodologie a été proposée pour définir les conditions de transfert des fibres dans une structure bicouche en étudiant les différentes variables et relations du modèle de la Figure 3.7.

3.3.1. Formalisation de l'étude

Dans cette étude nous allons particulièrement s'intéresser au transfert de fibres entre couche (structure bicouche), nous étudions le transfert des fibres provenant de la couche supérieure (couche à analyser) et migrant vers la couche inférieure (couche de référence). Cette dernière est la même pour l'ensemble des structures testées : elle contient 100% de fibres polyester (PET) de finesse 3.3 dTex de couleur noir, ceci afin de mieux voir le transfert des fibres blanches contenues dans la couche supérieure sur la face opposée (Figure 3.9).

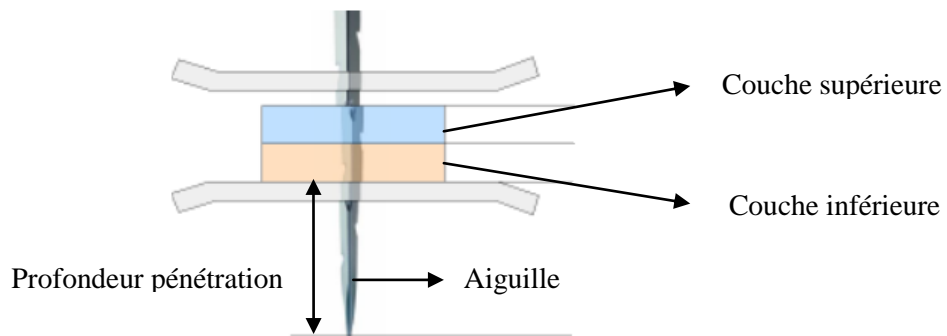


Figure 3. 9. Aiguilletage d'une structure nontissée bicouche pour l'étude de transfert de fibres

3.3.2. Plan d'expériences réalisé

Un plan d'expériences a été proposé par les experts du procédé d'aiguilletage, afin de mieux étudier l'association fibre/aiguille et le transfert de fibres entre les couches. Pour cela un modèle simplifié a été généré à partir du premier modèle (Figure 3.10). Le nouveau modèle comprend, en entrée (facteur du plan d'expériences ou facteur de conception) : le type de fibre, la finesse des fibres, le type d'aiguille, la profondeur de pénétration et le pas d'avance. Le modèle comprend en sortie (réponse du plan d'expériences ou critères de qualité) : la variation d'épaisseur (de la structure bicouche), la résistance au délaminage (entre les deux couches assemblées) et « *l'observation visuelle* » du transfert de fibres (observé sur la face opposée de la structure bicouche, par rapport à la face d'aiguilletage).

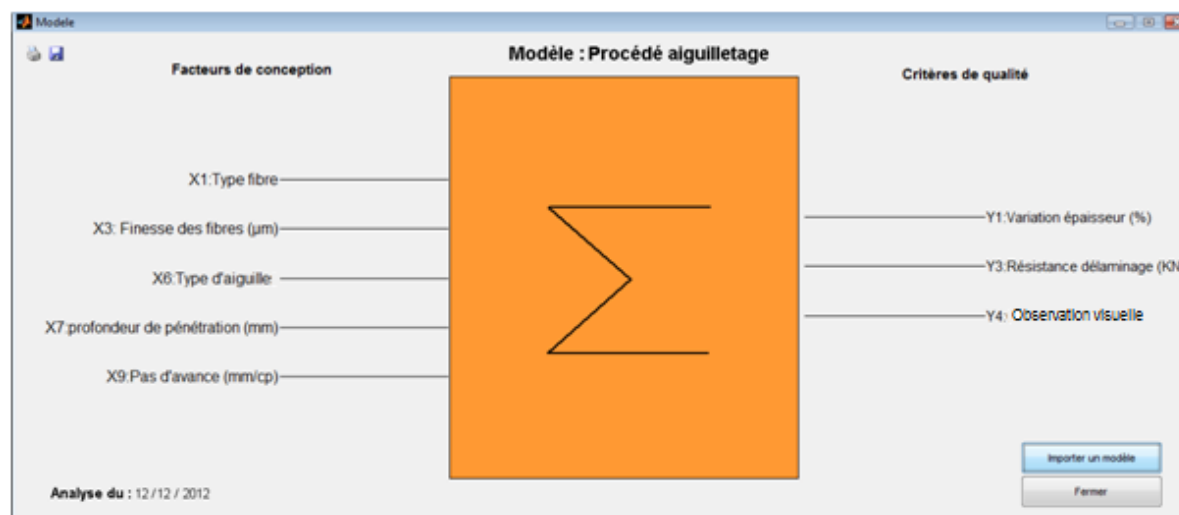


Figure 3. 10. Modèle simplifié des relations qualité de transfert des fibres en fonction des fibres et des aiguilles.

3.3.3. Facteurs du plan d'expériences (facteur de conception)

Nous allons présenter dans cette partie les variables d'entrées du modèle illustré dans la figure 3.10 qui montre les principaux facteurs de conception en matière première (type de fibre et finesse des fibres) et en paramètre procédé (type d'aiguilles, profondeur de pénétration des aiguilles (mm) et le pas d'avance (mm/cp)).

3.3.3.1. Variable X_1 / Matières premières : Type de fibre

Pour notre étude nous avons travaillé avec 5 mélanges de fibre, avec leur différentes caractéristiques et propriétés mécaniques, et afin de distinguer ces mélanges, nous les avons nommés comme suit : F_2 , F_3 , F_{4t1} , F_{4t2} , F_5 , F_6 et $B1$. Les caractéristiques de chacun de ces mélanges de fibres sont données dans le tableau 3.1 :

Tableau 3. 1. Caractéristiques des fibres utilisées pour l'étude

| Nom de la fibre | Famille | Titre (dTex) | Densité (g/cm ³) | Diamètre (µm) | Longueur (mm) |
|-----------------|---------------|--------------|------------------------------|---------------|---------------|
| Verre | Verre type E | 5.2 | 2.5 | 16.3 | 80 |
| Aramide | Para-aramide | 1.7 | 1.4 | 12.2 | 60 |
| PP | Polypropylene | 2.8 | 0.9 | 19.8 | 42 |
| PET6.7 | Polyester | 6.7 | 1.3 | 24.9 | 60 |
| PET1.7 | Polyester | 1.7 | 1.3 | 12.5 | 38 |
| PET3.3 | Polyester | 3.3 | 1.3 | 17.4 | 60 |
| PET17 | Polyester | 17 | 1.3 | 39.6 | 60 |
| Lin | Lin | 70* | 1.4 | 45.4 | |
| LM | Polyester | 2.2 | 1.3 | 14.2 | 51 |

* Estimation moyenne mesurée avec une grande variabilité au sein du lot.

Mélanges de fibres (pourcentages massiques) de la couche supérieure :

F2: 100% Aramide 1.7 dTex

F3: Verre / polypropylène (PP) proportion 50/50 en masse

F4t1: 100% polyester PET 6.7 dTex

F4t2: 100% polyester PET 1.7 dTex

F5: Lin / polypropylène (PP) 2.8 dTex 50/50 (Ø 19,8µm). (Nature)

F6: Polyester PET 3.3dTex noir / Fibre bicomposante de type noyau-écorce PET/co-PET proportion 50/50 en masse, finesse 2.2 dTex, longueur 51 mm, température de fusion opérationnelle de 115°C.

Fibre de la couche inférieure :

B1:100% polyester PET3.3 dTex noir

3.3.3.2. Variable X_3 / Matières premières : Finesse des fibres

La deuxième variable dans la catégorie matière première est la finesse des fibres, puisque nous avons utilisé des mélange de fibre, nous avons calculé ainsi la finesse moyenne de chaque mélange avec la formule suivante :

$$1/\phi_{Moy} = \% \text{ fibre1} / \phi_1 + \% \text{ fibre2} / \phi_2 \tag{3.1}$$

Le tableau 3.2 présente la finesse moyenne des mélanges de fibre utilisés pour l'étude

Tableau 3. 2. Finesse moyenne des mélanges de fibre utilisée

| Type de fibre | % Fibre 1 | % Fibre 2 | Finesse moyenne ϕ_{Moy} (µm) |
|---------------|-----------|-----------|-----------------------------------|
| <i>F2</i> | 100 | 0 | 12.2 |
| <i>F3</i> | 50 | 50 | 17.8 |
| <i>F4t1</i> | 100 | 0 | 24.8 |
| <i>F4t2</i> | 100 | 0 | 12.5 |
| <i>F5</i> | 50 | 50 | 21.7 |
| <i>F6</i> | 50 | 50 | 15.6 |

3.3.3.3. Variable X_6 / Paramètres procédé : Type d'aiguille

Pour notre étude, nous avons sélectionné des aiguilles non conventionnelles : forme de section de partie travaillante en étoile à 4 branches, forme conique de la partie travaillante, aiguille à couronne. Les critères de sélections sont soit lié à leur capacité théorique à entrainer des fibres, soit destinées à limiter les efforts de pénétration des aiguilles afin de limiter d'endommager les fibres et les aiguilles pendant l'aiguilletage. Ces aiguilles sont issues de la société Groz-Beckert®. Elles sont référencées aiguilles *A*, *B*, *C* et *D* :

Aiguille A : cross-star C4x1 avec une barbe par arrête.

Aiguille B : cross-star C4x2 avec deux barbes par arrête.

Aiguille C : à couronne S111 avec trois barbes sur le même niveau.

Aiguille D : conique R222 qui a la particularité d'avoir un profil en section et des tailles de barbes qui augmentent progressivement en s'éloignant de la pointe de l'aiguille, avec deux barbes par arrête.

Les caractéristiques de chacune de ces aiguilles sont données dans le tableau 3.3.

Tableau 3. 3. Caractéristiques des aiguilles utilisées

| Aiguille | Nom | Référence | Désignation | Classe aiguille | Profil section |
|----------|----------------------|-----------|---------------------------|-----------------|----------------|
| A | cross star 1 rangée | X_C4x1J36 | 15x18x36x3.5 C4x1 G 43427 | cross star | croix |
| B | cross star 2 rangées | X_C4x2J36 | 15x18x36x3 C4x2 G 43427 | cross star | croix |
| C | couronne | W_J36 | 15x18x36x3 S111 G 2027 | couronne | triangle |
| D | conique | C_R222J40 | 15x32x40x3 R222 G 530P7 | conique | triangle |

Nous tenons à signaler que nous n'avons pas pu réaliser tous les testes expérimentales, en particulier avec l'aiguille D, car nous avons eu une cassure de quelques aiguille de ce type. Ainsi quelques analyses ne prennent pas en compte cette aiguille.

3.3.3.4. Variables X_7 et X_9 / Paramètres procédé : Profondeur de pénétration et pas d'avance

La profondeur de pénétration est la distance entre l'extrémité de l'aiguille en position basse et la face inférieur de la structure à aiguilleter (ou la face supérieure de l'enclume). La profondeur de pénétration des aiguilles détermine le nombre de barbes qui travaillent et traversent le nontissé (barbes actives). Le pas d'avance, quant à lui, correspond à la distance entre deux impacts de la même aiguille entre deux frappes dans le nontissé, dans la direction de la production du nontissé. Il est inversement proportionnel à la densité d'aiguilletage, le nombre de coups d'aiguilles dans la structure nontissée par unité de surface.

Deux valeurs de profondeur de pénétration et de pas d'avance des aiguilles ont été définies pour le plan d'expériences.

Profondeur de pénétration des aiguilles : 10 mm et 15 mm.

Pas d'avance : 3 mm et 6 mm.

Ce qui nous donne quatre combinaisons pour ces deux paramètres procédés référencés comme suit :

1. Profondeur pénétration de 10 mm - pas d'avance de 3 mm (densité aiguilletage 29 impact d'aiguilles/cm²)
2. Profondeur pénétration de 10 mm - pas d'avance 6 mm (densité aiguilletage 29 impact d'aiguilles/cm²)
3. Profondeur pénétration de 15 mm - pas d'avance de 3 mm (densité aiguilletage 14 impact d'aiguilles/cm²)
4. Profondeur pénétration de 15 mm - pas d'avance 6 mm (densité aiguilletage 14 impact d'aiguilles/cm²)

3.3.3.5. Référencement des échantillons générés

Au final le plan d'expériences génère 120 prototypes (Annexe C), formant ainsi une base de données expérimentale assez riche pour lancer plusieurs analyses.

Dans tous les graphiques, les paramètres du procédé sont référencés de la manière suivante « $TIT2-N_eP_e$ » où:

$T1$: Le mélange de fibres de la couche supérieure : $F2, F3, F4t1, F4t2, F5, F6$,

$T2$: Le mélange de fibres de la couche inférieure : $B1$

N_e : Type d'aiguille : Aiguille A, B, C ou D

P_e : Conditions de profondeur de pénétration et de pas d'avance

Par exemple, l'échantillon référencé $F5B1-A1$ correspond à :

$F5$: type de mélange de fibres de la couche supérieure « Lin/PP 50/50 »

$B1$: type de fibre de la couche inférieure PET 1.7dTex

A : aiguille de type cross-star à une barbe

1 : profondeur pénétration de 10 mm et pas d'avance de 3 mm (densité aiguilletage 29 impact d'aiguilles/cm²)

3.3.4. Réponses du plan d'expériences (critères qualité)

Ce travail consiste à étudier la qualité de transfert des fibres. Cependant il n'est pas aisé de quantifier de manière fiable cette information. En effet les observations et les manipulations des matériaux fibreux ne sont pas simples. Parmi les techniques possibles (variables directes) :

- Observation visuelle par extraction comptage : fastidieuse et délicate car les échantillons sont fragiles
- Remplir de résine et faire une coupe longitudinale : délicat à réaliser, pas simple pour l'observation et peu représentatif
- Micro-tomographie par rayon X : approche quantitative complexe et demande l'accès à un appareil de mesure. l'identification des fibres entraînées par aiguilletage n'est pas simple par analyse des images.

Afin de tenter d'approcher cette information, trois approches partielles ont été proposées (variables indirectes): méthodes indicatives et surtout méthodes comparatives, avec avantages et inconvénients pour chacune, deux sont quantitatives et la dernière est qualitative.

3.3.4.1. Variable Y_1 : Variations d'épaisseur

La première approche correspond à la mesure de la variation d'épaisseur avant et après assemblage par aiguilletage. En effet, notre hypothèse consiste à dire qu'au plus le transfert de fibre est important, au plus la structure bicouche nontissée va diminuer en épaisseur.

Pour cette mesure, des échantillons de surface 0,1 m² sont découpés. Chaque échantillon est mesuré à l'aide d'un plateau presseur. Une pression de 0,01 kPa est appliquée pour réaliser la mesure. La précision de cette dernière est de 0,01 mm. Les résultats présentés sont la moyenne de cinq mesures. Cet essai fait référence à la norme NF EN ISO 5084-1996 ou G07-153.

Afin de répondre aux exigences du cahier des charges défini par les concepteurs, une fonction d'acceptabilité a été définie (Figure 3.11). Trois classes correspondant aux différentes modalités de la variable « *var eps* » (variation d'épaisseur) ont été proposées (C_{11} : Grande variation d'épaisseur [0.35, 1], C_{12} : Moyenne variation d'épaisseur]0.25, 0.35[et C_{13} : Petite variation d'épaisseur [0, 0.25]. L'objectif est de maximiser la variation d'épaisseur (classe C_{11}).

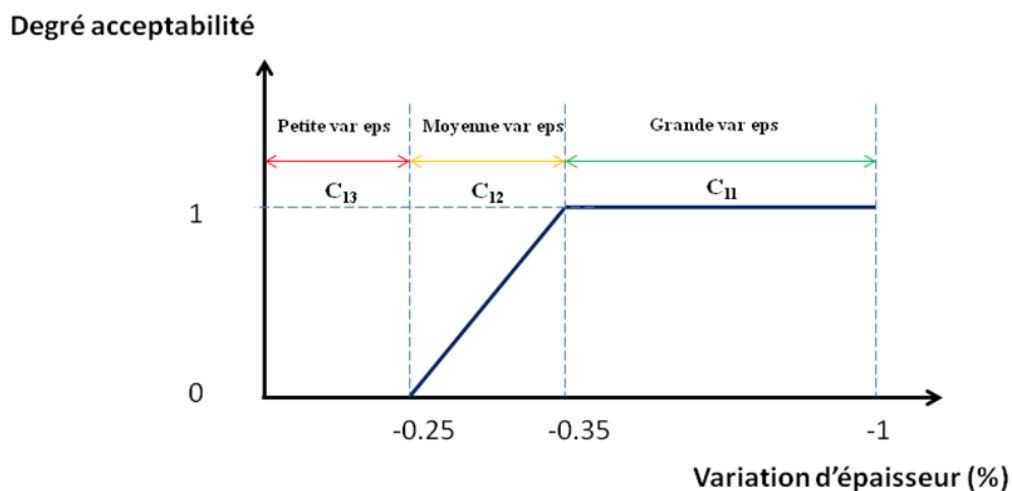


Figure 3. 11. Fonction d'acceptabilité associée au critère qualité Y_1 (variation épaisseur)

3.3.4.2. Variable Y_3 : Résistance au délaminage

La deuxième approche, également quantitative, consiste à mesurer la résistance à la séparation des deux couches assemblées par aiguilletage. Notre hypothèse consiste à dire qu'au plus le transfert de fibres est important, au plus la résistance au délaminage est élevée.

Ce test est réalisé avec une machine de traction, avec laquelle nous appliquons une charge de traction de 1kN afin de délaminer des échantillons de dimension 5 cm x 30 cm (Figure 3.12). Les résultats obtenus sont la moyenne de trois mesures par échantillon.



Figure 3. 12. Test de résistance au délaminage

La Figure 3.13 présente un exemple de résultat de test de résistance au délaminage obtenu avec les trois aiguilles A, B et C, pour la fibre F5 (mélange Lin/polypropylène (PP)), pour une profondeur de pénétration de 15 mm et un pas d'avance de 3 mm.

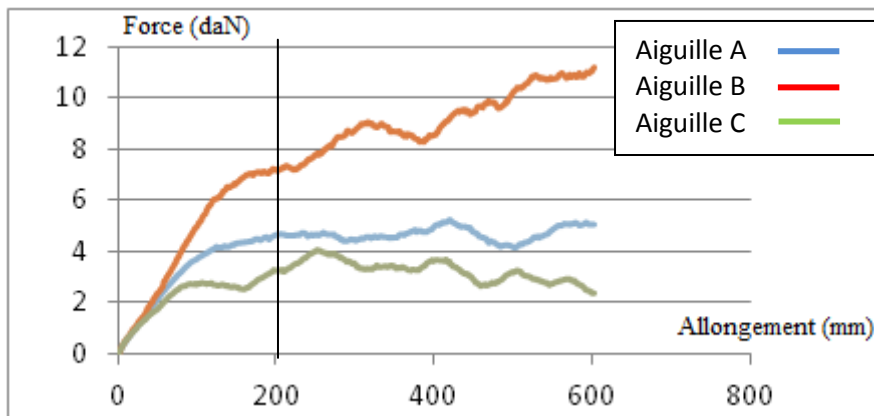


Figure 3. 13. Résultat d'un test de résistance au délaminage obtenu avec les trois aiguilles A (aiguille cross-star 1 barbe/arête), B (aiguille cross-star 2 barbes/arête) et C (aiguille couronne) pour l'échantillon F5.

Le tableau 3.4 présente les résultats du test de résistance au délaminage obtenu pour le mélange de fibres F5. Les résultats présentent la moyenne des tests après la séparation des deux couches, en occurrence après 200 mm pour la fibre F5.

Tableau 3. 4. Résultats du test de résistance au délaminage obtenu pour le mélange de fibres F5 avec les aiguilles A, B et C, selon les quatre conditions de profondeur de pénétration et de pas d'avance.

| Proto | F5B1-A1 | F5B1-A3 | F5B1-A2 | F5B1-A4 | F5B1-B1 | F5B1-B3 | F5B1-B2 | F5B1-B4 | F5B1-C1 | F5B1-C3 | F5B1-C2 | F5B1-C4 |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| RD (kN) | 1.85 | 4.31 | 0.57 | 1.50 | 1.56 | 7.88 | 0.50 | 2.71 | 1.75 | 3.01 | 0.58 | 1.12 |
| Ecart type | 0.53 | 1.23 | 0.15 | 0.45 | 0.47 | 2.24 | 0.10 | 0.45 | 0.35 | 0.67 | 0.11 | 0.17 |

Une fonction d'acceptabilité est aussi définie par les experts pour la résistance au délaminage « *res del* » (Figure 3.14). Trois classes correspondant aux différentes modalités de la variable ont été proposées (C_{31} : Grande résistance au délaminage [4, 100], C_{32} : Moyenne résistance au délaminage]1.5, 4[et C_{33} : Petite résistance au délaminage [0, 1.5]. L'objectif est de maximiser la résistance au délaminage (C_{31}).

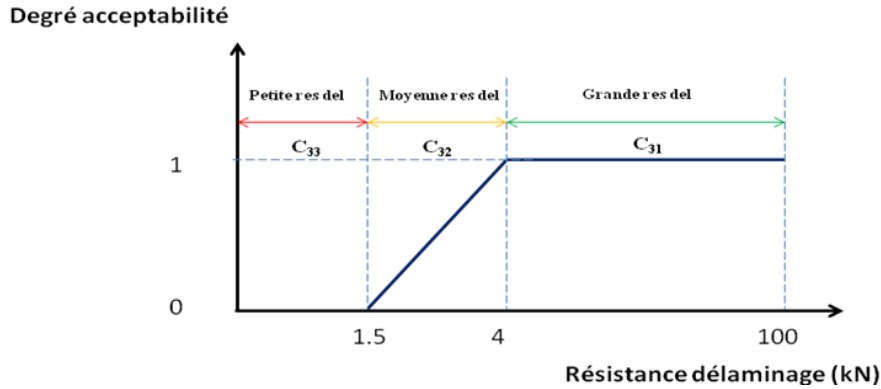


Figure 3. 14. Fonction d'acceptabilité associée au critère qualité Y_3 (Résistance au délaminage)

3.3.4.3. Variable Y_4 : Observation visuelle du transfert des fibres

La troisième approche proposée consiste à évaluer qualitativement le transfert de fibres entre les couches en observant visuellement la quantité de fibres apparentes sur la face opposée de la couche inférieure (Figure 3.15). Notre hypothèse consiste à dire que plus le transfert de fibres est important, plus nous verrons de fibres apparaître sur la face opposée du nontissé bicouche.

Cinq niveaux d'évaluation ont été utilisés pour quantifier le transfert des fibres, répondant à la question « voit-on apparaître des fibres de la couche supérieure sur la face opposée de la couche inférieure ? » :

Niveau 5 (*Oui clairement/ Yes clearly*) : le transfert de fibre entre les couches est très important

Niveau 4 (*Oui / Yes*) : le transfert de fibre entre les couches est important

Niveau 3 (*Moyen/ less*) : le transfert de fibre entre les couches est moyen

Niveau 2 (*Très moyen/ so less*) : le transfert de fibre entre les couches est très moyen

Niveau 1 (*Très très moyen / so so less*) : le transfert de fibre entre les couches est minime

Niveau 0 (*Non/ No*) : aucune fibre n'a été transférée

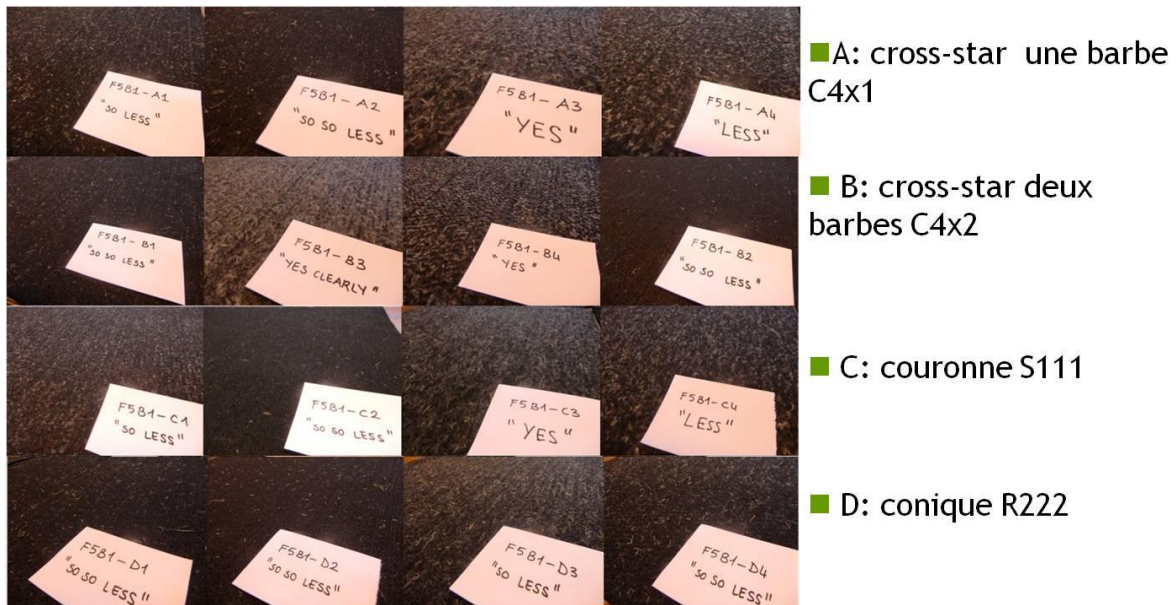


Figure 3. 15. Observation visuelle du transfert de fibres pour le mélange de fibres F5, dans le cas des aiguilles A, B, C et D, pour les quatre combinaisons de paramètre procédé.

L'observation visuelle a été réalisée d'abord manuellement, ensuite une interface logiciel a été développée et intégré au système d'aide à la conception pour réaliser une classification automatique et simplifier des images, utilisant les techniques de traitement d'images, en comparant chaque échantillon avec des images de références (Aucun transfert de fibre : niveau 0, peu : niveau 1 et 2, moyen : niveau 3 et bon : niveau 4 et 5) (Figure 3.16). Ainsi le logiciel génère automatiquement une cotation de l'observation visuelle.

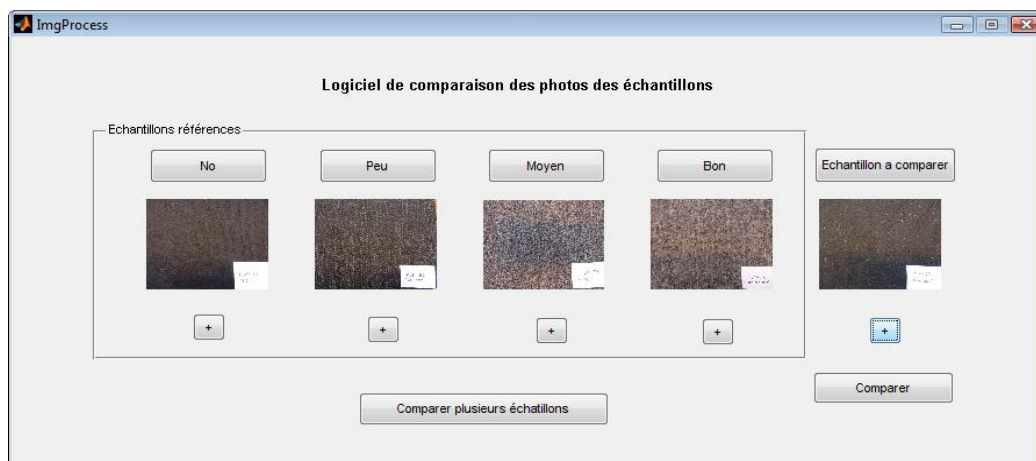


Figure 3. 16. Interface logicielle pour la cotation automatique de l'observation visuelle de transfert de fibre

Le tableau 3.5 montre un exemple de résultats de l'observation visuelle obtenus pour la fibre F5 :

Tableau 3. 5. Résultats obtenus pour l'observation visuelle avec la fibre F5

| Pr oto | F5B1 -A1 | F5B1 -A3 | F5B1 -A2 | F5B1 -A4 | F5B1 -B1 | F5B1 -B3 | F5B1 -B2 | F5B1 -B4 | F5B1 -C1 | F5B1 -C3 | F5B1 -C2 | F5B1 -C4 | F5B1 -D1 | F5B1 -D3 | F5B1 -D2 | F5B1 -D4 |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Y ₄ | 2 | 4 | 1 | 3 | 1 | 5 | 1 | 4 | 3 | 4 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 |

Dans cette partie d'étude, nous allons principalement nous intéresser aux aiguilles A, B et C.

De la même manière que précédemment, une fonction d'acceptabilité a été définie par les concepteurs pour l'observation visuelle « *obs vis* » (Figure 3.17). Afin de simplifier la modélisation et l'interprétation des résultats, nous avons proposé trois classes (C_{41} : Grande observation visuelle [3, 5], C_{42} : Moyenne observation visuelle]1, 3[et C_{43} : Petite observation visuelle [0, 1]). L'objectif est de maximiser l'observation visuelle (Classe C_{41}).

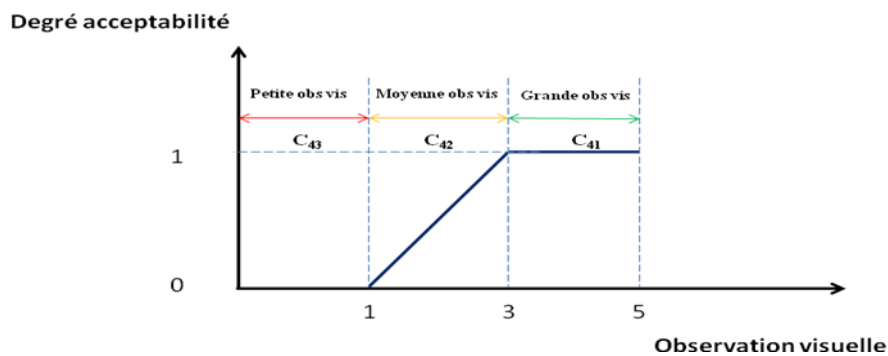


Figure 3. 17. Fonction d'acceptabilité associée au critère qualité Y₄(Observation visuelle)

3.3.4.4. Hypothèses sur la qualité de transfert des fibres

Afin de répondre aux besoins du cahier des charges en termes des meilleures conditions pour le transfert de fibre, trois hypothèses ont été formulées par les concepteurs pour quantifier et évaluer le transfert de fibres entre les couches :

Hypothèse 1 - Nous avons une meilleure qualité de transfert de fibres quand la variation d'épaisseur est grande.

Hypothèse 2 - Nous avons une meilleure qualité de transfert de fibres quand la résistance au délaminage des deux couches de nontissé assemblées est grande.

Hypothèse 3 - Plus nous voyons de fibres sur la face opposée à la structure bicouche, plus la qualité de transfert des fibres est élevée.

3.4. Modélisation pour la détermination de l'association fibres/aiguilles pour assurer le meilleur transfert des fibres

Comme nous l'avons présenté précédemment, la première partie de l'étude concerne la modélisation pour la détermination de l'association entre les fibres et les aiguilles pour assurer le meilleur transfert des fibres entre les couches, une étude qui s'avère intéressante aux regard

des concepteurs afin de comprendre le comportement des aiguilles pour un mélange de fibre donné, et sélectionner les meilleures aiguilles pour un meilleur transfert de fibres. Cette étude a été réalisée grâce au système d'aide à la conception présenté dans le chapitre 2, la première étape consiste ainsi à acquérir et formaliser les données d'apprentissage issues principalement des expérimentations et compléter ensuite ces données par la connaissance humaine des experts.

La Figure 3.18 illustre la démarche générale de l'étude, après acquisition des données expérimentales, importées souvent sous format Excel. La base de données est complétée et enrichie avec la connaissance des experts, pour appliquer ensuite les outils d'aide à la conception et d'analyse adapté du système.

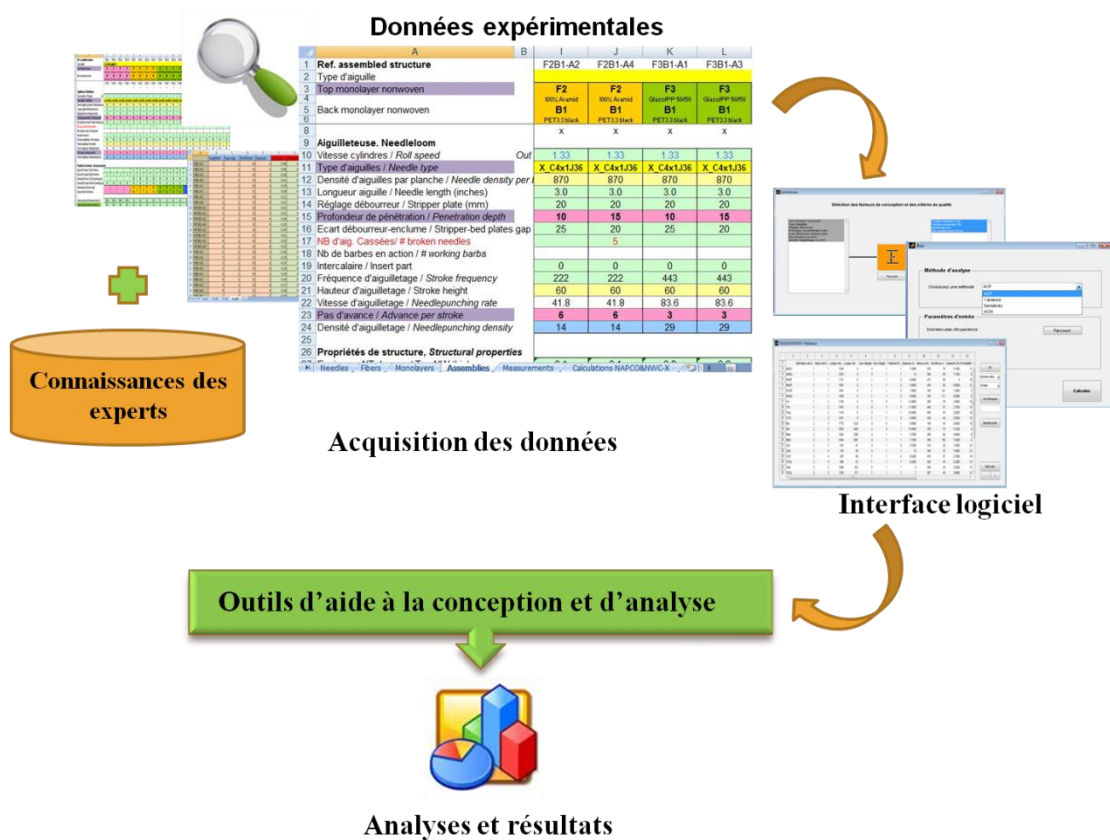


Figure 3. 18. Démarche générale de l'étude

Les interfaces des résultats et analyses présentées dans cette étude ont été générées via le système d'aide à la conception présenté dans le chapitre 2. L'utilisateur pourra grâce à ces interfaces mieux manipuler les données. Par exemple il pourra ajouter, modifier et supprimer des échantillons directement à partir de l'interface (Figure 3.19).

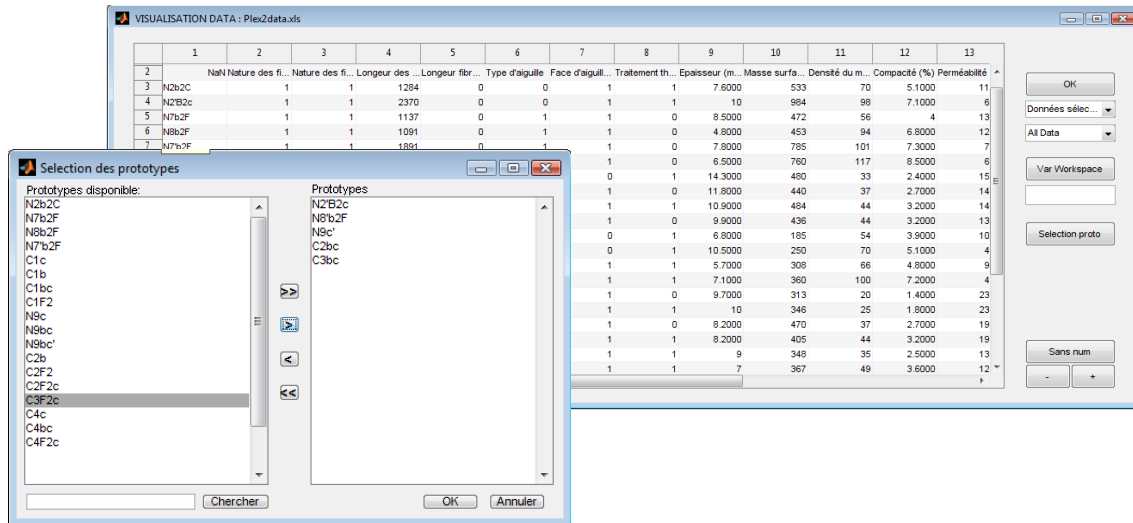


Figure 3. 19. Acquisition et formalisation de données

Après la formalisation des données, nous allons ensuite modéliser la détermination de l'association fibres et aiguilles pour assurer le meilleur transfert des fibres entre deux couches, Pour cela nous nous sommes particulièrement intéressés à l'analyse de la sensibilité des facteurs de conception, et à l'étude des relations de correspondance et de corrélation entres les variables définies.

3.4.1. Analyse de la sensibilité des facteurs de conception

L'analyse de la sensibilité des facteurs de conception du modèle proposé, permet une meilleure compréhension de l'influence des paramètres d'aiguilletage sur le transfert de fibres. Pour cela nous allons appliquer le premier outil d'aide à la conception présenté dans le chapitre 2, qui consiste à sélectionner et analyser la sensibilité et la pertinence des facteurs, et d'éliminer celles qui sont les moins pertinentes ou qui sont corrélées avec les variables dites pertinentes. Cette analyse est réalisée à l'aide d'un expert en aiguilletage.

Théoriquement, les paramètres d'entrées présélectionnés dans le modèle général peuvent être divisés en deux catégories : les paramètres directs et les paramètres indirects. Les paramètres directs peuvent être mesurés ou réglés directement. Les paramètres indirects sont, quant à eux, calculés à partir des règles physiques.

La Figure 3.20 montre une interface pour présenter les résultats de la sensibilité floue obtenus pour la variable de sortie Y_4 (*observation visuelle*).

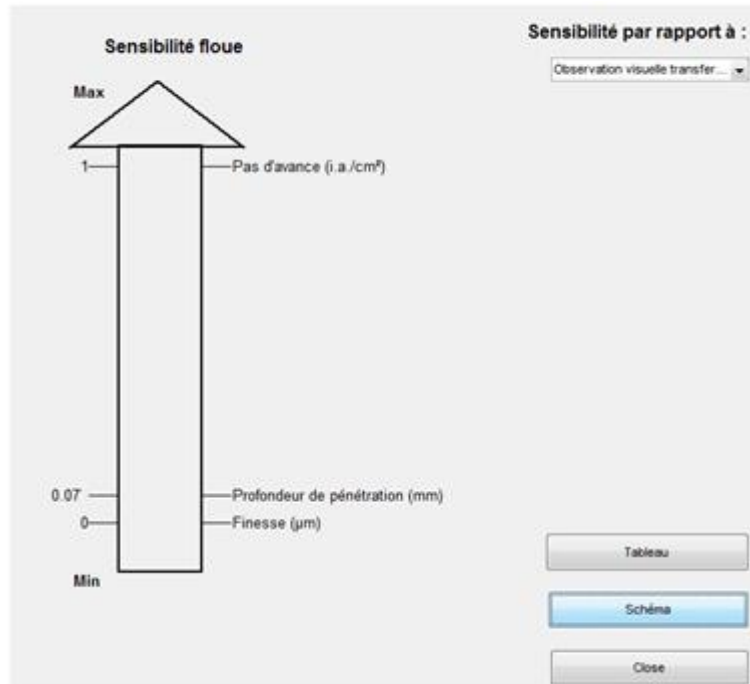


Figure 3. 20. Interface présentant les résultats de la sensibilité floue pour la variable de sortie Y_4 (*Observation visuelle*)

Les Figures 3.21, 3.22 et 3.23 présentent respectivement une partie de l'arbre de décision obtenu pour les variables de sorties « *variation épaisseur* », « *résistance au délaminage* » et « *observation visuelle* ». Afin de visualiser l'arbre de décision en entier, vous pouvez vous rendre à l'annexe à la fin du rapport (Annexe A : Figure 3.42, Figure 3.43 et Figure 3.44).

Les modalités de chaque critère de qualité sont définies comme suit : Blanc = modalité faible (non acceptable), Gris = modalité moyenne (acceptable) et Noir = modalité élevé (très acceptable).

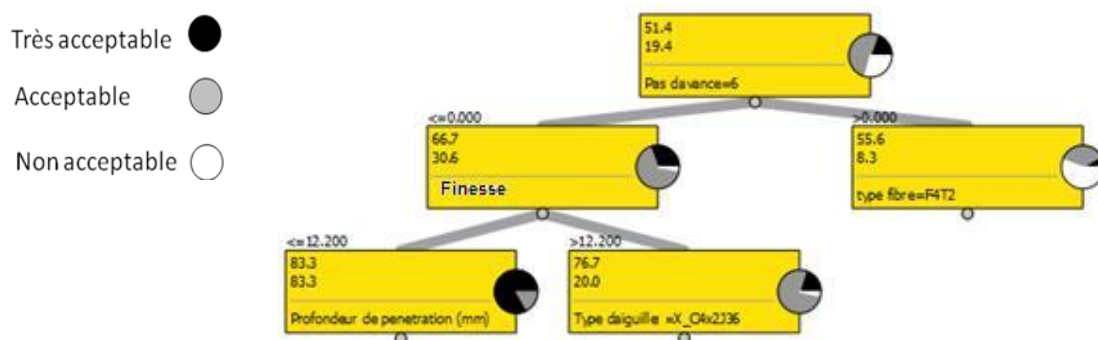


Figure 3. 21. Une partie de l'arbre de décision généré pour la variable de sortie Y_1

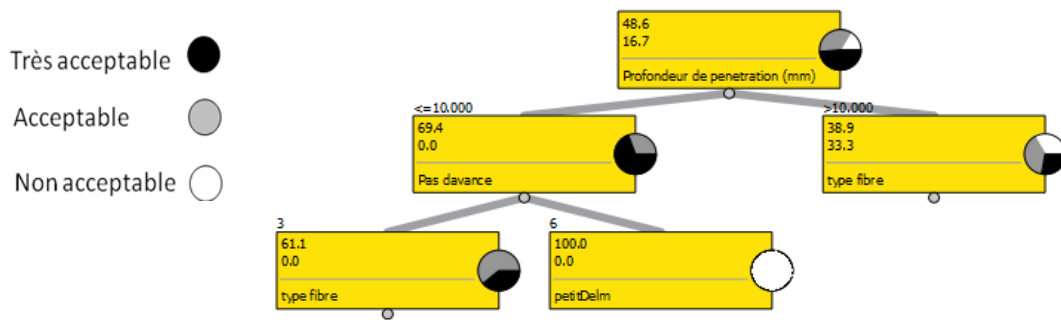


Figure 3. 22. Une partie de l'arbre de décision généré pour la variable de sortie Y_3

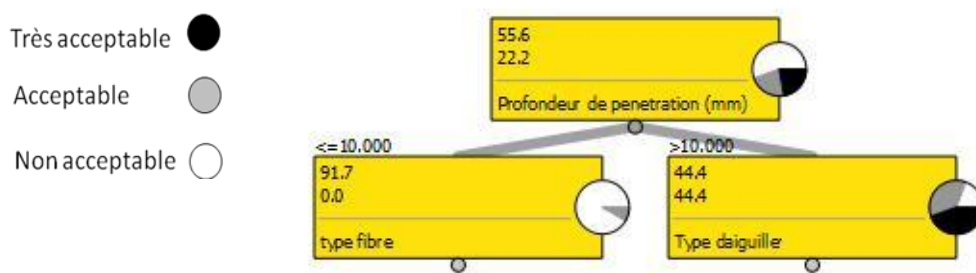


Figure 3. 23. Une partie de l'arbre de décision généré pour la variable de sortie Y_4

Nous allons maintenant comparer les résultats de l'outil 1 avec la méthode PROMETHEE et avec la nouvelle méthode de modélisation (Arbres de décision). Le tableau 3.6 récapitule les résultats de la pertinence des facteurs de conception pour les trois variables de sortie (Y_1 , Y_3 et Y_4) afin de mieux comparer les résultats de ces méthodes.

Tableau 3. 6. Résultats de comparaison de la pertinence des facteurs de conception entre les méthodes Sensibilité floue, PROMETHEE et Arbre de décision

| Classement | Sensibilité floue (Valeur floue) | | | PROMETHEE | | | Arbre de décision | | |
|------------|----------------------------------|-------------|-------------|-----------|-------|-------|-------------------|------------|------------|
| | Y_1 | Y_3 | Y_4 | Y_1 | Y_3 | Y_4 | Y_1 | Y_3 | Y_4 |
| 1 | $X_9(1)$ | $X_9(1)$ | $X_9(1)$ | X_9 | X_7 | X_7 | X_9 | X_7 | X_7 |
| 2 | $X_7(0.02)$ | $X_7(0.02)$ | $X_7(0.07)$ | X_3 | X_9 | X_9 | X_3, X_1 | X_1, X_9 | X_1, X_6 |
| 3 | $X_3(0)$ | $X_3(0)$ | $X_3(0)$ | X_7 | X_3 | X_3 | X_7, X_6 | X_6 | X_9 |
| 4 | | | | | | | | X_3 | X_3 |

X_1 : Type de fibre, X_3 : Finesse des fibres, X_6 : Type d'aiguille, X_7 : Profondeur de pénétration, X_9 : Pas d'avance

Y_1 : Variation d'épaisseur, Y_3 : Résistance au délaminage, Y_4 : Observation visuelle

D'après le tableau 3.6 nous rappelons d'abord que nous ne pouvons pas appliquer la méthode logique floue et la méthode PROMETHEE sur les variables nominales X_1 et X_6 car ces méthodes sont plus adaptées aux variables numériques, on pourrait appliquer une échelle ordianle pour ce type de variable, mais on perd le sens de ces données, ainsi il est important

d'utiliser leurs forme originales. En comparant les résultats de la méthode PROMETHEE avec les arbres de décision, nous constatons que nous obtenons le même ordre de pertinence par rapport aux variables numérique, contrairement avec la méthode sensibilité floue, qui montre ainsi ses limites en traitant uniquement les variables numériques. Par exemple, la profondeur de pénétration est toujours considérée comme variable peu sensible (0.02) pour toutes les variables de sorties, alors qu'elle est considérée comme la variable la plus sensible pour les variable de sorties Y_3 et Y_4 avec les deux autres méthodes. Un résultat qui semble logique pour les experts, qui considèrent que la profondeur de pénétration est une variable très pertinente. Les résultats de l'arbre de décision semblent ainsi les plus performants en traitant les variables qualitatives et quantitatives simultanément.

Nous allons nous intéresser maintenant aux différentes relations qui peuvent exister entre les variables d'entrées et de sorties. Pour cela, nous avons utilisé les différentes méthodes d'analyse classiques en les comparant à chaque fois avec les nouvelles méthodes proposées. Ces méthodes sont lancées directement à partir d'une boîte à outil, via une interface dynamique et interactive, qui donne au concepteur l'accès aux différentes méthodes d'analyse développées, qu'elles soient classiques (ACP, analyse de variance,...) ou intelligentes (arbre de décision, carte de Kohonen...).

3.4.2. Etude des relations de correspondance et de corrélation entre les variables

Afin d'étudier les relations de correspondances et de corrélation entre les variables, nous avons utilisé d'abord les méthodes classiques ACP pour les variables numériques et analyse de correspondances multiples (ACM) pour les variables qualitatives. Les résultats de l'ACP sont donnés par la figure 3.24. L'ACP est obtenue à partir des données numériques, pour les données qualitatives, une codification de ces dernières a été proposée. Par exemple, la prise en compte du « *type d'aiguille* » est réalisée ainsi : « 1 pour Aiguille A », « 2 pour Aiguille B » et « 3 pour Aiguille C ». Idem pour la variable « *type de fibre* ». L'ACP avec un taux d'explication de 54% par rapport aux deux composantes principales, nous permet de constater que nous avons une corrélation positive entre la variable « *résistance au délaminage* » et « *l'observation visuelle* », ou encore entre « *type de fibre* » et « *profondeur de pénétration* ». Nous remarquons aussi que nous avons une corrélation négative entre « *pas d'avance* » et « *finesse des fibres* », ou encore entre « *pas d'avance* » et « *type de fibres* ». Par contre nous n'avons pas une corrélation significative entre la variation d'épaisseur et l'observation visuelle, et cela est dû d'après les experts à la résistance des fibres.

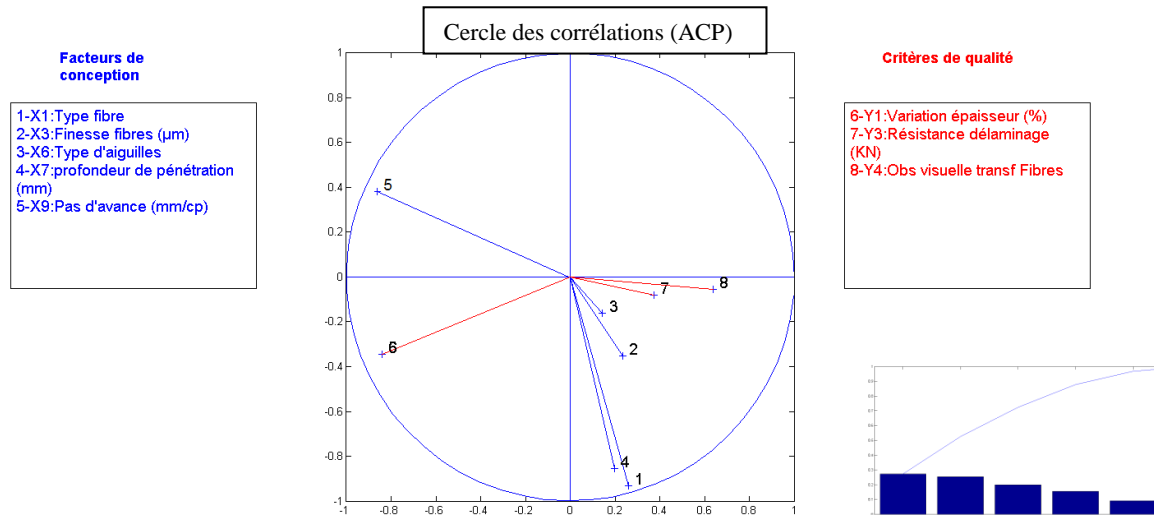
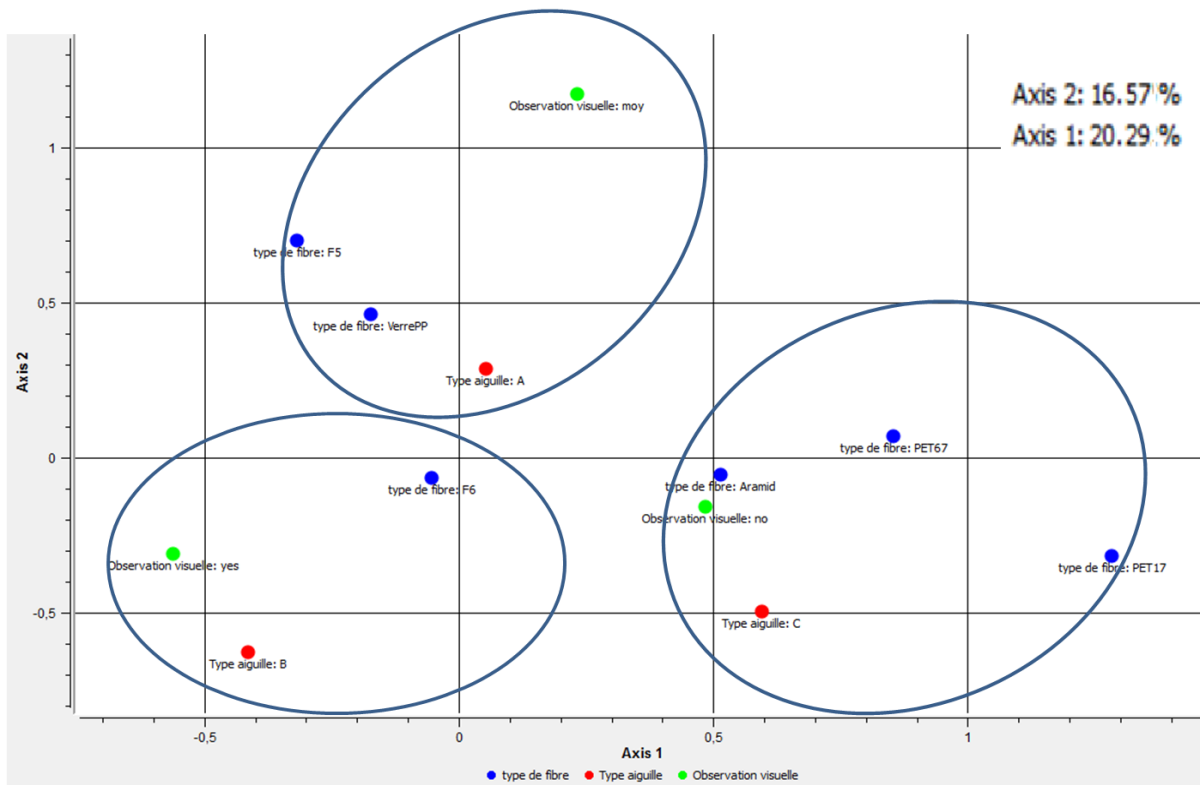


Figure 3. 24. ACP pour l'étude de corrélation entre les variables

D'autres corrélations existent, mais en générale ces corrélations ne sont pas évidentes à interpréter. En particulier entre les variables qualitatives « *type de fibre* » et « *type d'aiguille* », étant donné qu'une codification numérique a été utilisée pour le traitement des données nominales.

Une analyse en correspondance multiple ACM a été utilisée pour étudier les relations entre les variables nominales. Pour des raisons de simplicité, nous allons présenter uniquement les résultats de la variable de sortie Y_4 : Observation visuelle, relativement à l'étude du transfert de fibres.

La Figure 3.25 montre l'ACM pour les deux variables type d'aiguilles et type de fibres par rapport à l'observation visuelle. Afin de visualiser l'ACM pour les deux autres variables (variation d'épaisseur et résistance au délaminage), vous pouvez vous rendre à l'annexe à la fin du rapport (Annexe B : Figure 3.45 et Figure 3.46).



A : cross star 1 rangée, B : cross star 2 rangées, C : couronne

Figure 3. 25. ACM pour les deux variables type d'aiguilles et type de fibre par rapport à l'observation visuelle

L'ACM obtenu permet de comprendre quelques correspondances entre les deux variables « *type de fibre* » et « *type d'aiguille* ». Dans chaque cercle nous regroupons un « *type de fibre* », un « *type d'aiguille* » et les « *type de fibre* » les plus proches à ces derniers. Selon la variable de sortie « *observation visuelle* », nous constatons par exemple, que le « *type de fibre* » : F6, le transfert de fibres se fait mieux quand il est aiguilleté avec le « *type d'aiguille* » A ou B. Au contraire, nous constatons également que pour les échantillons *F4T1* (PET 1.7) , *F4T2* (PET 6.7) et *F2* (Aramid), quand ils sont aiguilletés avec l'aiguille C, nous ne visualisons aucun transfert de fibres. Comme pour l'ACP, les résultats de l'ACM donne des informations assez imprécises, et pour un taux de représentation selon les deux axes principaux assez faible 36.86%, eu égard à la complexité des données.

Nous allons maintenant utiliser les règles de décision des arbres générés précédemment pour étudier ces relations avec une meilleur précision. Nous rappelons que l'objectif de l'étude est de maximiser chaque critère de qualité ainsi les règles les plus pertinentes correspondent aux chemins qui donnent les valeurs maximales (très acceptable) de la sortie. Le tableau 3.7 présente les règles de décision les plus pertinentes générées a partir de l'arbre de décision pour maximiser la variable de sortie « *observation visuelle* ».

Tableau 3. 7. Les règles de décision les plus pertinentes générées à partir de l'arbre de décision pour maximiser la variable de sortie Y_4 « Observation visuelle »

| Règles de décision | Facteurs de conception | | | | Critères de qualité (Classes) Y_4 ALORS |
|------------------------|--|----------------------------|--------------------------|---------------------------|--|
| | SI | ET | ET | ET | |
| R₄₁ | <i>Profondeur de pénétration (mm) >10</i> | | | | |
| | | <i>Type d'aiguille = C</i> | | | |
| | | | <i>Type fibre = F2</i> | | |
| | | | | <i>Pas d'avance <6</i> | <i>Yes (100%)</i> |
| R₄₂ | | <i>Type d'aiguille = D</i> | | | |
| | | | <i>Type fibre = F2</i> | | <i>Yes (100%)</i> |
| R₄₃ | | | | <i>Pas d'avance <6</i> | <i>Yes (100%)</i> |
| R₄₄ | | | <i>Type fibre = F4T2</i> | | |
| | | | | <i>Pas d'avance <6</i> | <i>Yes (100%)</i> |
| R₄₅ | | | <i>Type fibre = F5</i> | | |
| | | | | <i>Pas d'avance <6</i> | <i>Yes (100%)</i> |
| R₄₆ | | | <i>Type fibre = F6</i> | | <i>Yes (100%)</i> |
| R₄₇ | | <i>Type d'aiguille = B</i> | | | |
| | | | <i>Type fibre = F2</i> | | |
| | | | | <i>Pas d'avance <6</i> | <i>Yes (100%)</i> |
| R₄₈ | | | <i>Type fibre = F3</i> | | <i>Yes (100%)</i> |
| R₄₉ | | | <i>Type fibre = F4T1</i> | | |
| | | | | <i>Pas d'avance <6</i> | <i>Yes (80,4%), NO (19,6)</i> |
| R₄₁₀ | | | <i>Type fibre = F4T2</i> | | |
| | | | <i>Type fibre = F5</i> | | <i>Yes (100%)</i> |
| R₄₁₁ | | | <i>Type fibre = F6</i> | | <i>Yes (100%)</i> |

B : cross star 2 rangées, C : couronne, D : conique

Les règles de décision identifiées au tableau 3.7, nous permettent de sélectionner les meilleures aiguilles pour chaque type de fibre, à condition d'utiliser en priorité une grande profondeur de pénétration (> 10 mm) et un petit pas d'avance (< 6 mm). Le tableau 3.7 nous

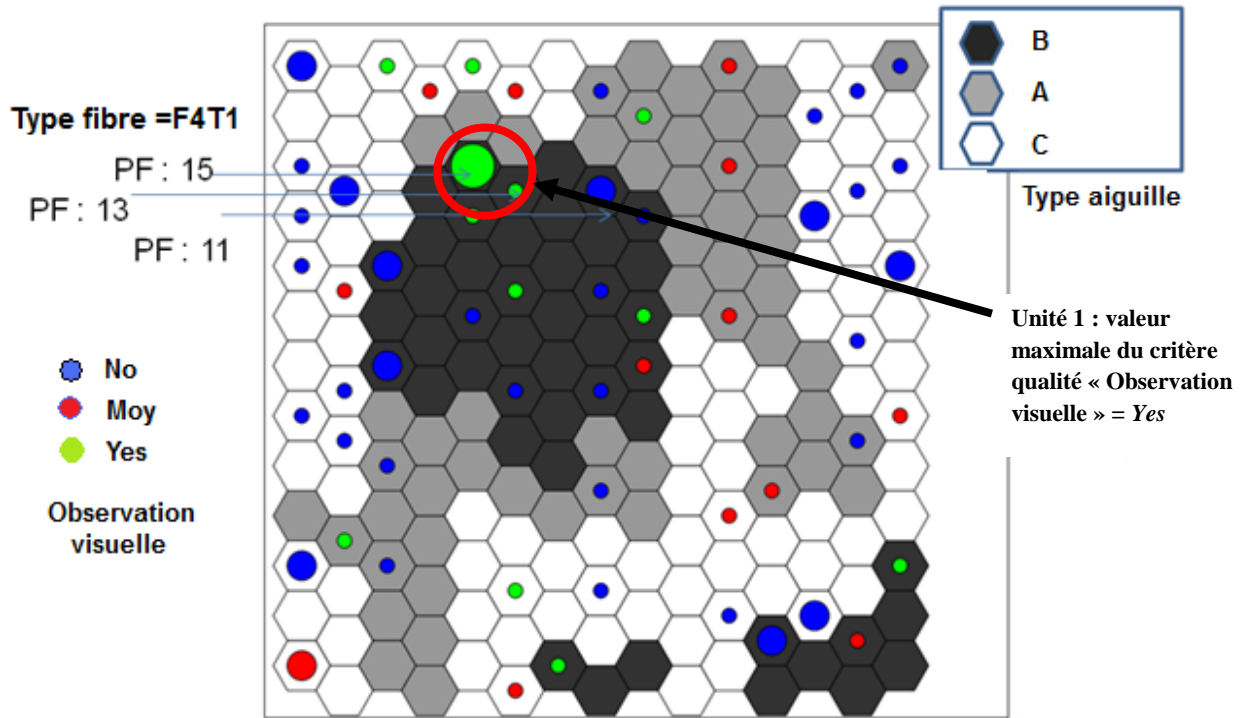
permet de constater que les aiguilles B et D représentent les meilleurs aiguilles pour l'ensemble des fibres utilisées.

Nous constatons que les règles identifiées sont satisfaites à 100 % sauf pour la règle R_{49} . Nous allons ainsi raffiner cette règle pour déterminer avec précision les intervalles de fonctionnement les plus pertinents pour les deux variables « *Profondeur de pénétration* » et « *Pas d'avance* ». Pour cela nous allons intégrer la connaissance humaine des experts qui vient enrichir la base de données. Cette connaissance est représentée sous forme de tableau (Tableau 3.8), extraites à partir d'un questionnaire prédéfini, basé sur les relations entre les critères de qualité et les paramètres d'entrées identifiés, Ce questionnaire est généralement rempli par plusieurs experts avec différents niveaux d'expertise. Rappelons que cette connaissance est souvent incomplète et vague. Ainsi notre système intègre cette difficulté d'analyse des données en milieu incertain grâce à la nature des différents outils d'aide à la conception et d'analyse développé à cet effet.

Tableau 3. 8. Formalisation de la connaissance humaine des experts

| Connaissance de l'expert | Conséquence : Critères de qualité Variation épaisseur | Conséquence : Critères de qualité Résistance délamination | Conséquence : Critères de qualité Observation visuelle | Conditions : Facteurs de conception | |
|--------------------------|---|---|--|-------------------------------------|----------------------|
| | | | | Paramètres procédé | |
| Regle ₁ | Grande | Grande | Grande | Profondeur pénétration = grand | Pas d'avance = petit |
| Regle ₂ | Petite | Petite | Petite | Profondeur pénétration = petit | Pas d'avance = grand |
| Regle ₃ | Grande | - | Grande | Type d'aiguille = Fourche | |
| Regle ₄ | Grande | - | Grande | Type d'aiguille (nb barbe = grand) | |
| Regle ₅ | Grande | - | Grande | Type de fibre = Aramide | |
| Regle ₆ | Grande | - | Grande | Type de fibre (diamètre =petit) | |

Pour notre étude nous nous sommes appuyés principalement sur la connaissance d'un seul expert. D'après le tableau 3.8 qui présente les règles de décision les plus pertinentes générées à partir de l'arbre de décision pour maximiser la variable de sortie « *observation visuelle* », nous pouvons constater que les connaissances sont incomplètes, que ce soit par rapport à la matière première ou aux paramètres structure du nontissé, un manque qui pourra influencer sur la performance des outils et la qualité des résultats par la suite. La Figure 3.26 montre un exemple d'une carte de Kohonen générée à partir des données expérimentales et de la connaissance humaine.



A : cross star 1 rangée, B : cross star 2 rangées, C : couronne, D : conique
 PF : profondeur de pénétration

Figure 3. 26. Carte de Kohonen relative à la variable « Type d'aiguille » par rapport à la variable « Observation visuelle »

A partir de la carte de la figure 3.26, nous pouvons constater que l'unité 1, est la classe majoritaire correspondant à la valeur maximale du critère de qualité « Observation visuelle », qui est conforme avec la règle de décision R_{49} du tableau 3.7. Nous allons ainsi, extraire les informations associées à cette unité afin de raffiner cette règle, nous obtenons alors :

$R_{49} = SI \text{ « Profondeur de pénétration » } \subset \{11, 15\} \text{ ET « Type d'aiguille » } = B \text{ ET « Type de fibre » } = F4T1 \text{ ET « Pas d'avance » } \subset \{3, 3\} \text{ ALORS « Observation visuelle » } = \text{yes (100\%)}$

3.5. Modélisation pour l'estimation de la quantité de fibres transportées par le procédé d'aiguilletage

La deuxième partie de l'étude est consacrée à la modélisation du transport de fibres dans une architecture fibreuse obtenue par aiguilletage, afin notamment d'étudier la quantité de fibres transportées entre les couches. Pour cela d'autres modèles ont été développés, qui viennent compléter des modèles analytiques existants, et afin de valider les modèles proposés, une analyse expérimentale est réalisée pour comparer les résultats et améliorer les modèles proposés en s'appuyant sur les résultats de la première étude en terme de pertinence des variables et de leurs corrélations et correspondances.

Dans la littérature, il existe très peu de modèles analytiques pour quantifier le transfert de fibres. Brunschweiler [Russel, 2007], Watanabe [Watanabe, 2004] et Ponsolle [Ponsolle, 1997], ont proposé des formules mathématiques pour calculer le nombre théorique de fibres capturées par les aiguilles, des formules parfois délicates à utiliser et qui donnent souvent des résultats loin de la réalité sur le nombre réel de fibres transportées. Après avoir analysé les limites de ces méthodes, nous proposerons une nouvelle technique pour la modélisation de la quantité de fibres transportées.

3.5.1. Sélection des paramètres de l'aiguille les plus pertinents

Une aiguille est caractérisée par plusieurs paramètres et plusieurs zones de fonctionnement, la figure 3.27 présente le modèle générale avec les principaux paramètres liés à la variable X_6 : *Type d'aiguille*, cette dernière est devisée en plusieurs sous variable $X_{6,i}$ ($i=1,..,19$).

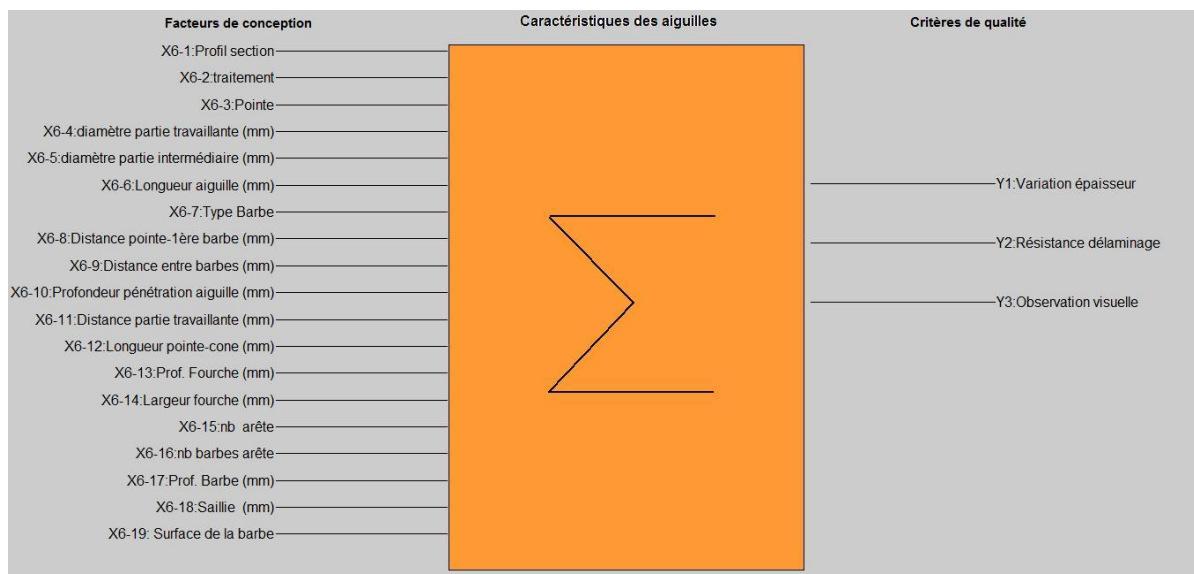


Figure 3. 27. Modèle générale pour l'étude du comportement d'une aiguille relativement à la qualité de transfert des fibres pendant l'opération d'aiguilletage

Nous constatons toujours le nombre important des paramètres d'entrées du modèle (19 variables), ainsi il est nécessaire de simplifier le modèle de la figure 3.27, en calculant la pertinence des facteurs de conceptions par rapport aux trois critères qualité Y_1 , Y_2 et Y_3 en utilisant l'arbre de décision (Figure 3.28)

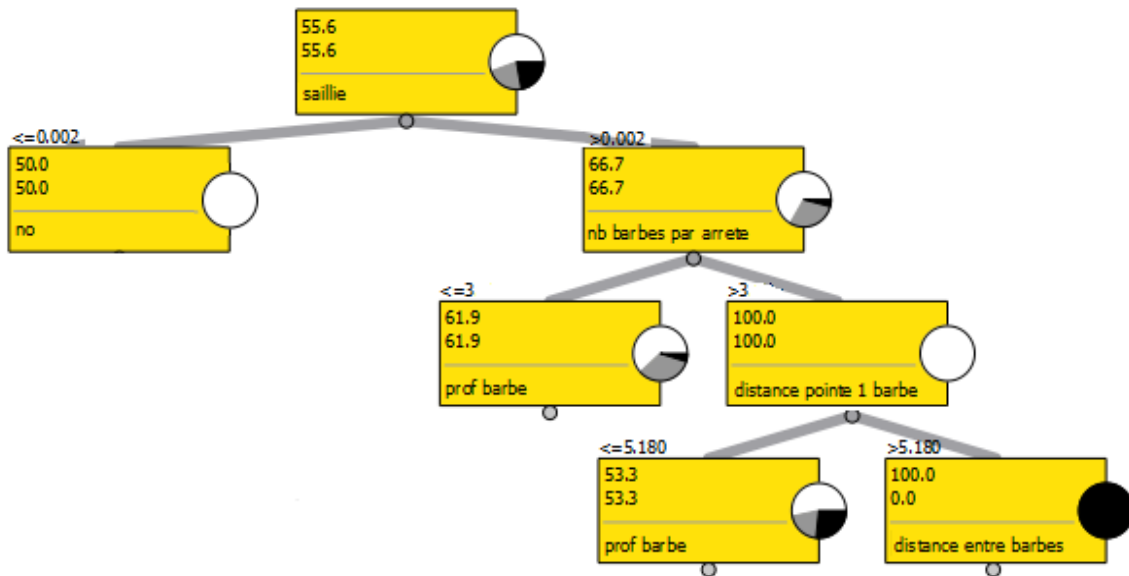


Figure 3. 28. Une partie de l'arbre de décision associé au modèle générale pour l'étude du comportement des aiguilles.

Le Tableau 3.9, présente le résultat de classement des cinq facteurs de conception ayant une grande pertinence pour l'ensemble des critères qualité Y_1 , Y_2 et Y_3 .

Tableau 3. 9. Liste de paramètres de conception ayant une grande pertinence

| Paramètre de conception | X_{6-8} | X_{6-9} | X_{6-16} | X_{6-17} | X_{6-18} |
|-------------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Rang | 3 | 4 | 2 | 3 | 1 |

D'après les résultats obtenus avec l'arbre de décision, les paramètres de conception les plus pertinents sur le comportement de l'aiguille lors du transfert de fibres entre les couches est donné respectivement comme suit : X_{6-18} « saillie de la barbe », X_{6-16} « nombre de barbes par arête », X_{6-17} « profondeur de la barbe », X_{6-8} « distance entre pointe et 1 ère barbe » (même rang pour ces deux dernières variables) et enfin X_{6-9} « distance entre barbes ».

La Figure 3.29 et le tableau 3.10, présentent respectivement, une représentation d'une aiguille avec les différentes zones et les valeurs des paramètres de conception les plus pertinents.

D'après les experts de l'aiguilletage, il existe aussi d'autres paramètres indirects calculés à partir des autres paramètres mesurés, qui peuvent être pertinents pour l'étude. Parmi eux, nous avons la « surface de la barbe » (zone nommé 'S' Figure 3.29), c'est la zone où les fibres atterrissent lors de l'aiguilletage.

Caractéristiques des aiguilles :

- d : X_{6-8} /Distance pointe-1ère barbe (mm)
- X : X_{6-9} /Distance entre barbes (mm)
- N : X_{6-16} /Nombre de barbes sur toutes les arêtes
- M : X_{6-17} /Profondeur de la barbe (mm)
- K : X_{6-18} /Saillie (mm)
- S : X_{6-19} /Surface de la barbe (μm^2)

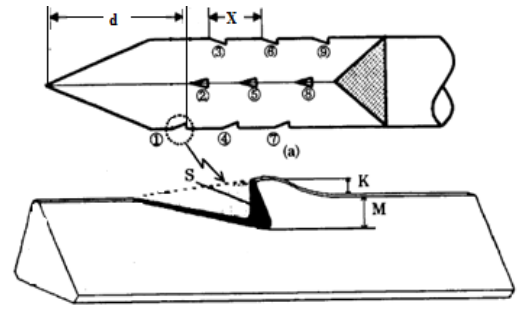


Figure 3. 29. Présentation des paramètres les plus pertinents d'une aiguille

Tableau 3. 10. Caractéristiques des aiguilles A, B, C, et D

| Aiguilles | M (mm) | K (mm) | S (μm^2) | X (mm) | d (mm) | N |
|-----------|-------------|-----------|-------------------------|----------|----------|-----|
| A | 0.06 | 0.005 | 1.95 | 0.795 | 3.18 | 4 |
| B | 0.05 | 0.005 | 1.38 | 0.795 | 3.18 | 8 |
| C | 0.06 | 0.01 | 2.42 | 1 | 3.18 | 3 |
| D* | 0.04 / 0.06 | 0 / 0.005 | 0.92 / 2.25 | 2.12 | 3.18 | 6 |

A : cross star 1 rangée, B : cross star 2 rangées, C : couronne, D : conique

* Aiguille D : les valeurs de la première barbe sont différentes de la deuxième

Signalons que par la suite, nous allons utiliser la profondeur totale de la barbe, qui correspond à la profondeur de la barbe (M) + la saillie (K).

Comme nous l'avons déjà vu dans la première partie de l'étude le nombre de barbets par arête peut être très pertinent sur le transfert de fibre. Par la suite, nous allons nous intéresser aux barbets dites actives qui transfèrent réellement des fibres. Le nombre de barbets actives correspond au nombre de barbets à l'intérieur de la zone travaillante de l'aiguille, où la zone travaillante de l'aiguille correspond à la zone à l'intérieur de laquelle les barbets transportent la fibre (Figure 3.30). Nous allons présenter dans la section 3.5.2 une méthode de calcul qui permet d'estimer le nombre de barbets actives.

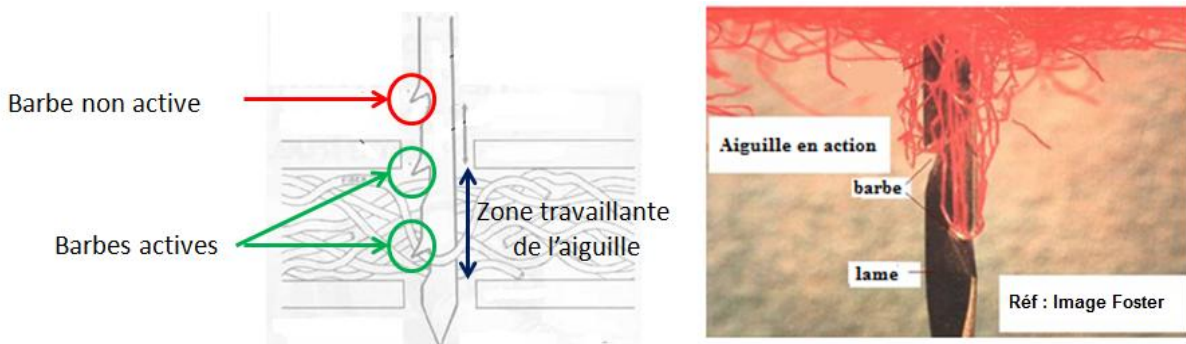


Figure 3. 30. Barbe active et non active d'une aiguille à l'intérieure de la zone travaillante

3.5.2. Modèles analytiques disponibles dans la littérature

➤ **Modèle analytique de Brunschweiler et al.[Russel, 2007] :**

Brunschweiler propose une formule mathématique simple, qui permet de calculer le nombre de fibres qui peuvent être capturées par l'ensemble des barbes actives de l'aiguille.

$$n_{f(Brunschweiler)} = \frac{2 \cdot b_d}{d_f} \cdot r \quad (3.2)$$

Où :

$n_{f(Brunschweiler)}$: nombre de fibres collectées par une aiguille

b_d : profondeur totale de la barbe

d_f : diamètre des fibres

r : nombre de barbes actives

Le principe de la formule de Brunschweiler consiste à calculer le nombre de fibres qui peuvent être capturées par une barbe active (Figure 3.31), en prenant en considération la géométrie de l'aiguille (la profondeur de la barbe) par rapport au diamètre des fibres.

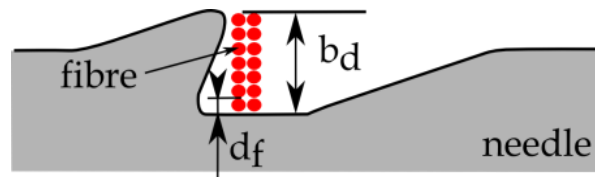


Figure 3. 31. Estimations des fibres collectées par une barbe selon la formule de Brunschweiler

➤ **Modèle analytique de Watanabe et al. [Watanabe, 2004]**

Une autre formule a été proposée par Akira Watanabe, qui prend en considération la densité du nontissé et la géométrie de la barbe, le nombre de fibres collectées par une aiguille est calculé comme suit.

$$n_{f(Watanabe)} = \frac{S \cdot W_n}{E \cdot Z_{av} \cdot \rho_f \cdot \pi \cdot d_f^2} N \quad (3.3)$$

Où :

$n_{f(Brunschweiler)}$: nombre de fibres collectées par une aiguille

S : surface de la barbe

W_n : grammage du nontissé

Z_{av} : longueur moyenne des fibres

ρ_f :densité des fibres

g : nombre d'arêtes

d_f : diamètre des fibres

N : nombre totale des barbes

La formule de Watanabe calcule le nombre de fibres par mm^2 de surface de nontissé et multiplie ce nombre par la superficie de base de la barbe (Figure 3.32). Ainsi nous pourrions estimer le nombre de fibres potentiellement capturées par une aiguille, en multipliant le nombre de fibre par barbe avec le nombre totale de barbe dans une aiguille.

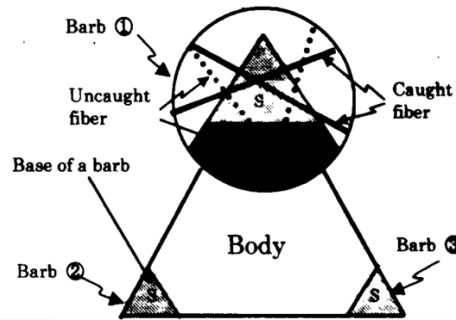


Figure 3. 32. Illustration des fibres capturées par une barbe pour une aiguille triangulaire [Watanabe, 2004]

➤ **Modèle analytique de Ponsolle [Ponsolle, 1997]**

La troisième formule, proposée par Ponsolle prend en considération en plus de la géométrie de l'aiguille, les paramètres procédé de l'aiguilletage, notamment la profondeur de pénétration de l'aiguille. Le nombre de fibres collectées par une aiguille est donné par la formule suivante :

$$n_{f(Ponsolle)} = \frac{(P-d) - (r-1) X}{t} n_c r \quad (3.4)$$

Où :

$n_{f(Ponsolle)}$ = nombre de fibres collectées par une aiguille

P : profondeur de pénétration de l'aiguille

d : distance entre première barbe et la pointe

X : distance entre barbes

t : épaisseur du nontissé avant aiguilletage

r : nombre de barbes actives

n_c = nombre de fibres capturées par une barbe

Avec la formule de Ponsolle et pour la première barbe ($r = 1$), nous calculons le rapport entre la distance entre barbes et l'épaisseur, multiplié par le nombre de fibres transportées par les barbes. Et pour l'ensemble des barbes, nous estimons d'abord la zone travaillante ($P-d$) et nous soustrairons la première barbe de l'ensemble des barbes actives.

➤ **Estimations du nombre de barbes actives**

Une barbe active, comme nous l'avons défini précédemment, correspond au nombre de barbes à l'intérieur de la zone travaillante qui transportent réellement des fibres. Ponsolle [Ponsolle, 1997] a proposé une formule qui a été adaptée à notre étude qui permet d'estimer le nombre de barbes actives dans une aiguille :

$$r = \text{Min} \left(E \left[\frac{P+t-d}{X} \right] + 1, N \right) \quad (3.5)$$

Où :

- P : profondeur de pénétration
- d : distance première barbe et la pointe
- X : distance entre barbes
- t : épaisseur du nontissé avant aiguilletage
- r : le nombre de barbes actives
- N : nombre totale des barbes

Avec $t = t_1 + t_2$

- t_1 = épaisseur de la structure nontissée supérieure
- t_2 = épaisseur de la structure nontissée inférieure

La Figure 3.33 montre un exemple d'estimation des barbes actives et inactives pour une aiguille, nous pouvons voir sur la figure que les barbes 1, 2 et 3 sont actives, car elles pénètrent complètement la structure du nontissé, tandis que la barbe 4 est inactive. Dans ce cas le nombre de barbes actives est 3.

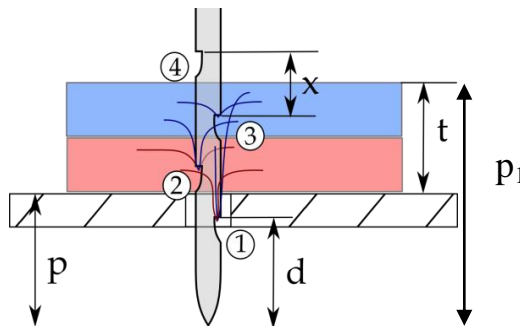


Figure 3. 33. Estimations des barbes actives et inactives pour une aiguille

p = distance entre pointe de l'aiguille en position basse et la partie supérieure de l'enclume.

p_1 = distance entre pointe de l'aiguille en position basse et la face supérieure du nontissé supérieure = $p + t$

Le tableau 3.11 présente le nombre de barbes actives « r » pour les quatre aiguilles utilisées A, B, C et D, pour chacune des deux profondeurs de pénétrations réglées, et pour le

« type de fibre » F2 (Aramide). D'après les résultats, nous constatons que toutes barbes des aiguilles sont actives.

Tableau 3. 11. Estimation du nombre de barbes actives « r » pour les aiguilles A, B, C et D, et le type de fibre F2 « Aramid »

| Aiguilles | p (mm) | $t1$ (mm) | $t2$ (mm) | t (mm) | $p1$ (mm) | d (mm) | X (mm) | N | r |
|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|----------|----------|-----|-----|
| A | 10 | 6.1 | 7.3 | 13.4 | 23.4 | 3.18 | 0.795 | 4 | 4 |
| | 15 | 6.1 | 7.3 | 13.4 | 28.4 | 3.18 | 0.795 | 4 | 4 |
| B | 10 | 6.1 | 7.3 | 13.4 | 23.4 | 3.18 | 0.795 | 8 | 8 |
| | 15 | 6.1 | 7.3 | 13.4 | 28.4 | 3.18 | 0.795 | 8 | 8 |
| C | 10 | 6.1 | 7.3 | 13.4 | 23.4 | 3.18 | 1 | 3 | 3 |
| | 15 | 6.1 | 7.3 | 13.4 | 28.4 | 3.18 | 1 | 3 | 3 |
| D | 10 | 6.1 | 7.3 | 13.4 | 23.4 | 3.18 | 2.12 | 6 | 6 |
| | 15 | 6.1 | 7.3 | 13.4 | 28.4 | 3.18 | 2.12 | 6 | 6 |

A : cross star 1 rangée, B : cross star 2 rangées, C : couronne, D : conique

3.5.3. Analyse expérimentale : quantification manuelle du nombre de fibres transférées

Afin de valider les résultats et la fiabilité des modèles théoriques une analyse expérimentale a été réalisée pour comparer ces résultats avec le nombre réel de fibres transportées au cours de l'aiguilletage.

Pour cela nous avons effectué un délaminage manuel du nontissé (Figure 3.34), afin de séparer les deux couches et ensuite couper les fibres transportées avec une paire de pinces à partir de la base pour avoir un faisceau de fibres. Les fibres extraites sont alors comptées sous une loupe. Pour notre étude nous nous sommes intéressés particulièrement à la fibre d'aramide (F2) et pour avoir un résultat plus précis, cinq manipulations sont réalisées sur chaque échantillon, ce qui reste peu d'un point de vue statistique, mais néanmoins fastidieux.

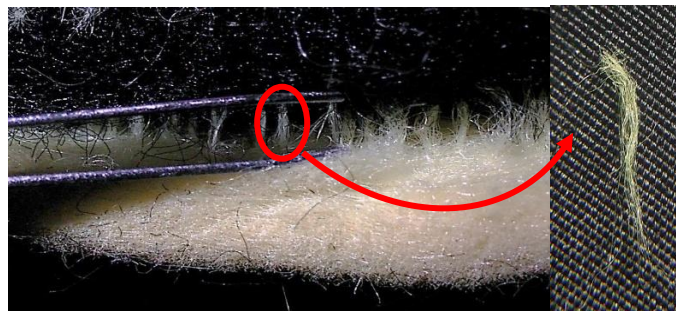


Figure 3. 34. Analyse expérimentale pour quantifier le nombre de fibres transportées- faisceau de fibres aiguilletées

Le tableau 3.12 présente les résultats obtenus de l'analyse expérimentale des quatre aiguilles A, B, C et D pour la fibre d'aramide avec la condition d'aiguilletage « 3 » (profondeur de pénétration 10 mm et pas d'avance 6 mm).

Tableau 3. 12. Nombre de fibres transférées pour les aiguilles A, B, C et D, et pour la fibre F2 Aramide pour le paramètre « 3 »

| Type fibre | F2B1 | F2B1 | F2B1 | F2B1 |
|------------------------------|------|------|------|-------|
| Aiguille | A | B | C | D |
| Paramètres | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Nombre de fibres transportés | 24 | 44 | 17 | 34 |
| | 27 | 30 | 19 | 64 |
| | 23 | 46 | 28 | 36 |
| | 37 | 47 | 23 | 59 |
| | 44 | 48 | 21 | 29 |
| Moyenne | 31.0 | 43 | 21.6 | 44.4 |
| Ecart type | 8.17 | 6.63 | 3.77 | 14.24 |

A : cross star 1 rangée, B : cross star 2 rangées, C : couronne, D : conique

D'après le tableau 3.12, nous constatons que les aiguilles B et D transportent mieux la fibre d'aramide, ceci confirme pour l'instant les résultats obtenus dans la partie 3.4.2.

Pour calculer maintenant le nombre total de fibres transportées par rapport à la surface totale de la structure nontissée, il est nécessaire de connaître le nombre de faisceaux par centimètre carré. Pour cela nous avons compté le nombre d'impacts des aiguilles sur la couche supérieure du nontissé et, connaissant la densité d'aiguilletage, nous pouvons ainsi calculer le nombre de fibres total en multipliant la densité par le nombre d'impacts. Pour notre étude nous avons sélectionné une zone de 5x5 cm² (Figure 3.35).



Figure 3. 35. Analyse expérimentale pour quantifier le nombre de fibres transportées- nombre d'impacts sur la couche supérieure du nontissé aiguilleté

En comparant les valeurs théoriques et expérimentales des impacts (Figure 3.36), nous constatons que, pour une densité d'aiguilletage faible, les valeurs mesurées sont presque égales au nombre théorique, tandis que, pour une densité d'aiguilletage élevée les valeurs mesurées sont beaucoup plus faible que prévu. Ceci est dû probablement au fait que certaines aiguilles pénètrent dans le même trou lors de l'aiguilletage du nontissé, cela conduit à transporter davantage de fibres par les impacts perforées deux fois.

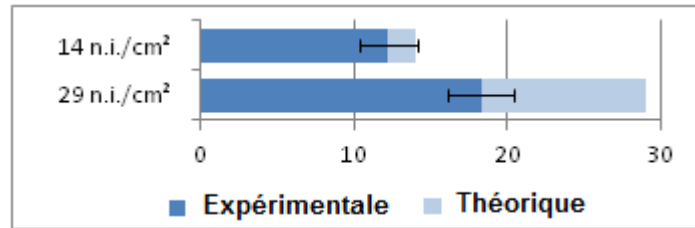


Figure 3.36. Comparaison entre les valeurs théoriques et expérimentales des impacts par cm²

3.5.4. Comparaison entre les modèles théoriques et analyse expérimentale pour l'estimation des fibres transportées

Nous allons maintenant comparer les résultats des modèles théoriques avec ceux de l'analyse expérimentale (Annexe D). Pour cela nous allons d'abord présenter les résultats que nous avons obtenus avec les trois modèles analytiques : Brunschweiler, Watanabe et Ponsolle, ces résultats sont aussi générés et calculés via une interface logicielle du système d'aide à la conception (Figure 3.37).

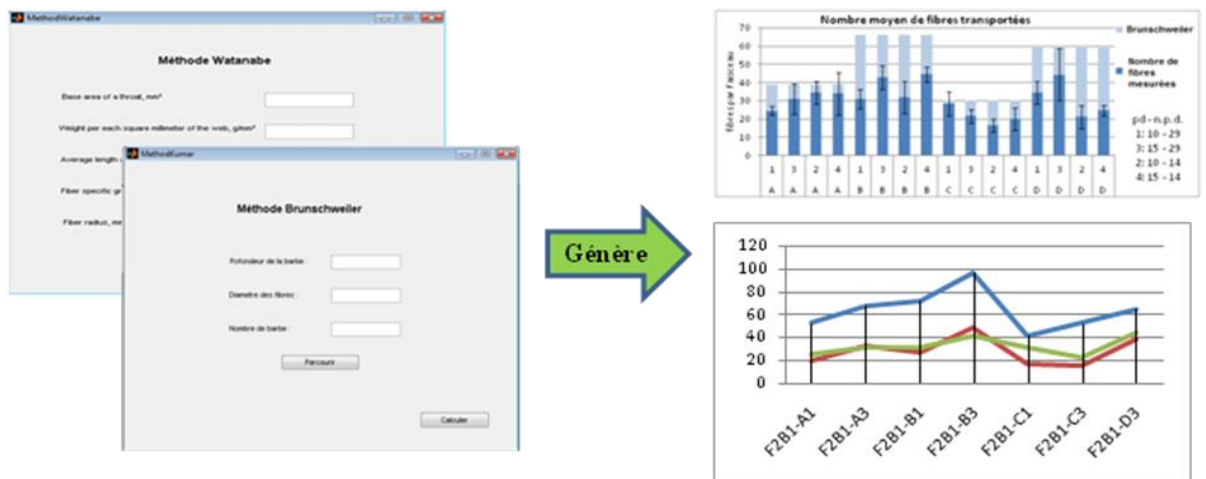
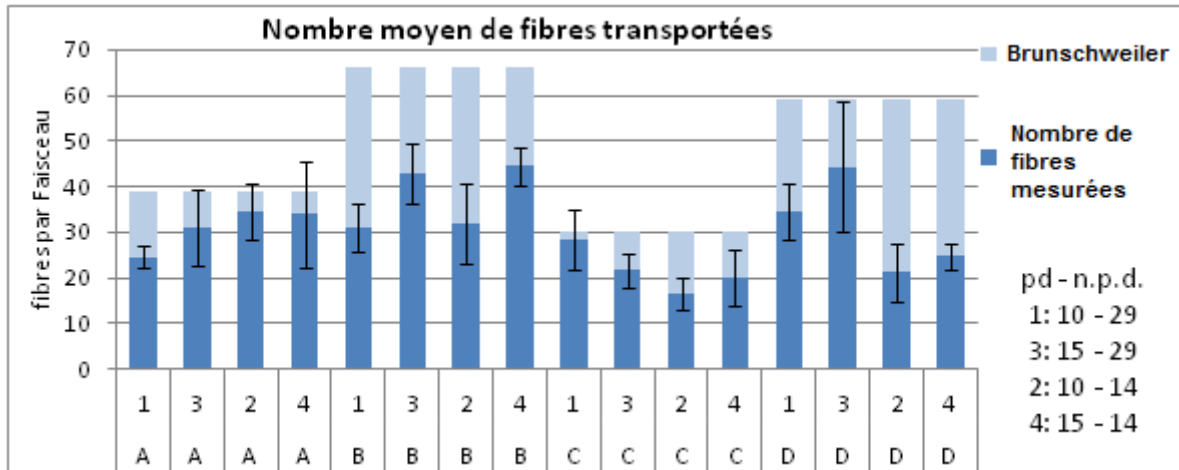


Figure 3.37. Interface logicielle pour le calcul de fibres transportées avec les modèles théoriques

La Figure 3.38 présente les résultats d'un modèle théorique (Brunschweiler) avec les valeurs expérimentales. Nous constatons que le nombre de fibres transportées avec les modèles théoriques pour l'ensemble des aiguilles et avec les différents paramètres procédé, est toujours supérieur par rapport aux résultats expérimentaux, ainsi les résultats des modèles sont trop élevés par rapport à ce qu'il semble être dans la réalité.



A : cross star 1 rangée, B : cross star 2 rangées, C : couronne, D : conique

Figure 3. 38. Comparaison des résultats d'un modèle théorique avec l'analyse expérimentale pour la fibre d'aramide F2

3.5.5. Amélioration des modèles théoriques

Les origines possibles des écarts entre le modèle théorique et les valeurs expérimentales sont dues principalement à deux raisons :

- Les formules considèrent que les barbes transportent le même nombre de fibres alors que et d'après les expert de l'aiguilletage, les premières barbes transportent souvent le double de fibres que les autres barbes du niveau supérieur.
- Les formules ne prennent pas en considération la densité des fibres dans la structure nontissée, un paramètre qui peut être très important sur la quantité de fibre transportées.

En s'appuyant sur les résultats de l'arbre de décision présenté précédemment, où nous avons constaté que la saillie et le nombre de barbes par arête sont deux facteurs très pertinents dans le transfert de fibres. Ainsi, deux améliorations ont été proposées :

La première amélioration, consiste à associer un coefficient de transfert de fibre pour chaque type de saillie de l'aiguille, en considérant que les barbes avec une saillie petite sont plus pertinentes en transfert de fibre que les barbes avec une grande saillie (Figure 3.39).

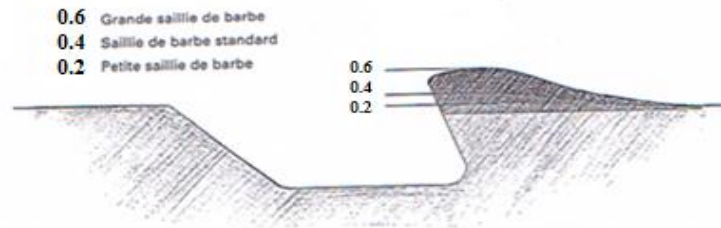


Figure 3. 39. Différent types de saillie de barbe d'une aiguille

Le tableau 3.13 présente les valeurs des coefficients de pertinence pour chaque type de saillie. Pour l'aiguille D, deux coefficients différents sont définis, car la première rangée des barbes est différente de la deuxième rangée. Quand la saillie est nulle, nous avons associé un coefficient de 1 (la barbe ne sera pas avantagée).

Tableau 3. 13. Valeur des coefficients de pertinence pour chaque type de saillie

| Aiguilles | K : saillie (mm) | Coefficient saillie |
|-----------|--------------------|---------------------|
| <i>A</i> | 0.005 | 0.2 |
| <i>B</i> | 0.005 | 0.2 |
| <i>C</i> | 0.01 | 0.6 |
| <i>D</i> | 0 / 0.005 | 1 / 0.2 |

A : cross star 1 rangée, *B* : cross star 2 rangées, *C* : couronne, *D* : conique

La deuxième amélioration consiste à associer un coefficient de transfert de fibre pour chaque barbe de chaque arête par niveau (Figure 3.40), nous considérons que les barbes du niveau 1 sont plus pertinente en transport de fibres que celles du niveau 2 : les barbes du niveau 1 transportent le double de fibres que niveau 2.

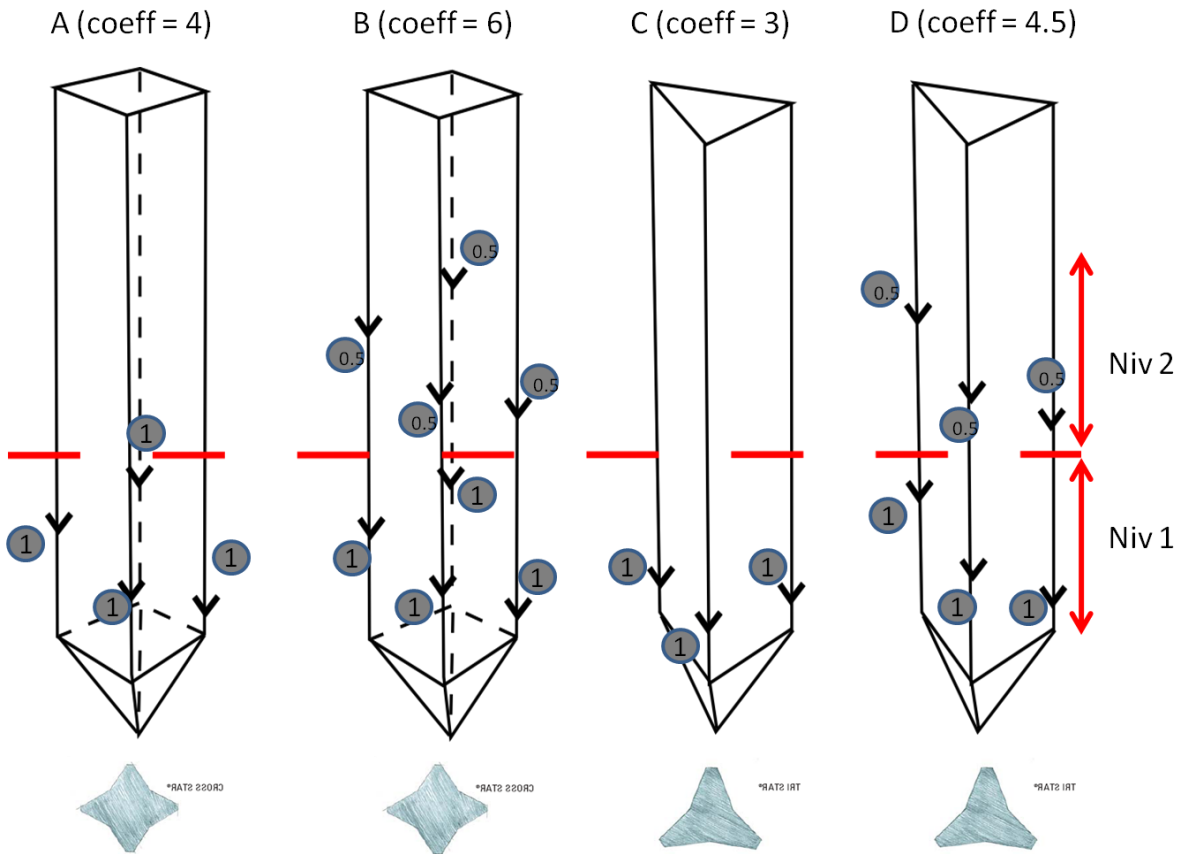


Figure 3. 40. Coefficient de transfert de fibre pour chaque barbe par niveau

La Figure 3.41 présente les résultats des modèles théoriques avant et après amélioration pour l'ensemble des aiguilles et pour un type particulier de fibre 'Aramid' ($F2$), pour les trois modèles théoriques Brunschweiler (Figure 3.41-(a)), Watanabe (Figure 3.41-(b)) et Ponsolle (Figure 3.41-(c)). Nous constatons que les améliorations proposées apportent de meilleurs résultats, en effet, les valeurs sont plus proche de la valeur observée, en particulier avec le modèle de Ponsolle (Figure 3.41-(c)), nous avons pratiquement les mêmes résultats théorique et réel du nombre de fibres transférées. Ainsi nous pouvons considérer le modèle de Ponsolle amélioré comme le meilleur modèle pour le calcul théorique du transfert de fibres. D'autres améliorations peuvent être prises en considération, notamment la densité des fibres, le mouvement des fibres lors de la pénétration des aiguilles, etc.

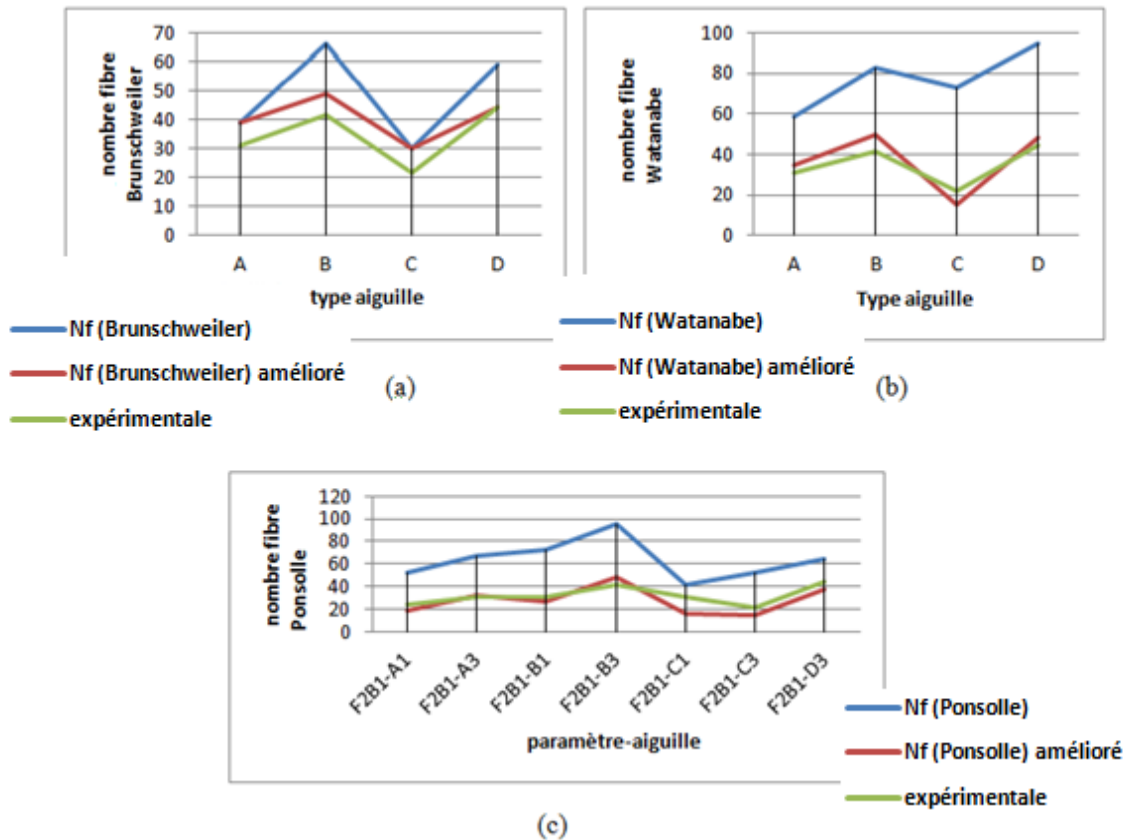


Figure 3. 41. Comparaison des résultats de transfert de fibres des modèles avant et après amélioration avec l'analyse expérimentale

3.6. Conclusion

L'étude sur le procédé d'aiguilletage nous a confirmé la complexité de la maîtrise d'un procédé industriel tel que l'aiguilletage. Elle nous a également montré les difficultés de mise en œuvre d'une procédure de conception en raison de nombreuses contraintes, parmi lesquelles, la multitude des facteurs de conception, qu'elles soient liées aux matières premières, aux paramètres de procédé ou aux paramètres de structure.

L'application des modèles développés, basés principalement sur des techniques intelligentes pour modéliser les procédés industriels par intégration de données expérimentales et de la connaissance humaine, et en étudiant les relations entre les critères de qualité et les facteurs de conception, en particulier liée ici au développement et à la compréhension du procédé, ont permis d'aider les concepteurs à identifier les meilleures combinaisons fibre/aiguilles, et quantifier le transfert de fibre, et de montrer les limites des techniques classiques notamment dans le traitement des variables nominales.

L'étude en générale nous a permis de générer des informations très utiles pour la conception de nouveau procédé d'aiguilletage, en proposant par exemple des améliorations sur les modèles théoriques pour une meilleure quantification de transfert de fibre par rapport

à la réalité, ou aussi la sélection des parties de l'aiguille les plus pertinents dans le transfert de fibre. Une étude qui peut être enrichi par l'intégration de d'autres variables de sortie comme la résistance à la pénétration des aiguilles, une intégration qui pourra expliquer davantage les comportements particuliers. Nous pourrions aussi compléter l'étude par le développement de structures tricouche avec intercallage d'une mousse entre les couches fibreuses ou par le développement de structures bicouches avec un vide entre les deux couches. Ou aussi tester d'autre type d'aiguilles notamment avec des barbes moins agressives ou avec d'autres géométries.

Chapitre 4 - Application au développement de produits : étude des relations propriété/structure de biocomposites thermoplastiques

4.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons utiliser le système d'aide à la conception pour accompagner le développement de produits biocomposites thermoplastiques. Ces produits, se développant de façon très significative cette dernière décennie [Vroman, 2010], présentent de nouveaux enjeux environnementaux notamment dans le domaine des transports et de l'automobile en particulier [Witten, 2010], et apportent sans cesse des performances croissantes permettant aux industriels d'envisager des solutions techniques innovantes et concurrentielles. Des recherches et des études sont effectuées pour remplacer les pièces renforcées par fibres de verre qui ont un impact environnemental plus important, lié à la production et aux recyclages des composants. L'une des pistes convoitées, notamment pour les pièces composites, est l'utilisation des fibres végétales comme renfort.

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés au développement de composites à base de polymère thermoplastique et renforcés par fibres de lin. Ces composites sont obtenus par thermocompression de structures nontissées composées d'un mélange intime de fibres végétales et de fibres thermoplastiques. Le but est ici d'étudier les relations entre les propriétés du produit et les paramètres de structure, en utilisant les outils d'aide à la conception développés. En effet, les relations entre les propriétés mécaniques/acoustiques et les caractéristiques de structures des composites sont complexes et font apparaître des compromis à trouver. Ainsi, optimiser ces matériaux selon un cahier des charges précis exige une bonne connaissance du comportement de ces matériaux.

Dans un premier temps, nous allons étudier la pertinence des facteurs de conception, dans un second temps, la définition des zones de fonctionnement les plus pertinentes et enfin l'évaluation multifonctionnelle des produits réalisés. Pour cela nous nous sommes particulièrement intéressés à l'étude de l'influence de la qualité du lin (étoupe, filasse et filasse affinée) et de divers polymères thermoplastiques mis en œuvre dans la fabrication des composites (PP, PLA, PA11) sur les propriétés mécaniques et acoustiques des composites. Nous allons aussi étudier l'influence de certains paramètres comme la porosité, la densité massique du composite et le taux volumique de fibres.

4.2. Description des matériaux utilisés : les biocomposites

4.2.1. Définition

Les biocomposites sont des matériaux polymériques renforcés par des fibres dont une partie est d'origine bio-sourcée. Concernant le renfort mis en œuvre dans les biocomposites, il est généralement issu de ressources renouvelables. A titre d'exemple, on peut citer les fibres comme le lin, le chanvre, le kéraf... Les matrices utilisées dans les biocomposites sont généralement des polymères synthétiques thermoplastiques (PE, PP, PVC..) ou thermodurcissables. On peut également mettre en œuvre des biopolymères comme le PLA (acide polylactique) ou le PA11 (polyamide 11) extraits de ressources renouvelables comme l'amidon ou l'huile de ricin, respectivement. Dans ce cas on parle de composite vert [Fowler, 2006].

4.2.2. Mise en œuvre et présentation des produits

4.2.2.1. Fibres de renfort utilisées (Étoupe/Lin 80/Lin 120/ Lin affiné)

Dans la conception des biocomposites, nous avons pris la fibre de lin comme référence d'étude pour élargir le domaine d'application et viser d'autre utilisation que le textile. Grâce à ces matériaux, on pourrait donner une valeur ajoutée à cette fibre. Etant donné que le procédé de fabrication de nos produits reste encore sur une échelle d'étude au laboratoire, la connaissance de différentes propriétés de la fibre de lin nous permettra de définir les différents paramètres qui influent sur les matériaux élaborés.

Le choix du renfort utilisé dans la fabrication des biocomposites, est porté sur la fibre de lin sous différentes qualités. Les fibres de lin mises en œuvre dans l'élaboration des matériaux sont (Figure 4.1) :

Étoupe de lin : C'est la fibre la plus courte du lin, avec une qualité plus faible que celle de la filasse. Elle peut être considérée comme un co-produit issu du teillage, opération qui vise à séparer la fibre de lin de la partie boisée de la tige. On y trouve plus d'impureté (anas) qu'en filasse. Elle est généralement utilisée pour des applications composites.

Filasse de lin en 80mm et 120mm : La forme la plus longue des fibres. Directement issue de l'opération de teillage, elle est considérée comme noble et nettoyée d'une grande partie des anas. La fibre a été coupée à deux longueurs différentes dans le but de voir l'impact de la longueur sur les propriétés des composites.



Figure 4. 1. Les différents types de fibre de lin mises en œuvre dans la fabrication des composites

4.2.2.2. Résines utilisées (PP/PLA/PA11)

On choisit un procédé d'obtention des composites par thermo compression et on choisit de mettre en œuvre des polymères thermoplastiques. En effet, lors de la fabrication, il a été amené à fondre le polymère, introduit sous forme de fibre, pour créer la matrice du composite. (Figure 4.3)

Différentes résines ont été testées :

Polypropylène (PP) : issu du pétrole, sous forme de fibre synthétique, non bio-dégradable mais qui peut être recyclée facilement. Puisque cette dernière est fortement utilisée en industrie, nous l'avons pris comme référence d'étude.

L'acide polylactique (PLA) : extrait de l'amidon extrait par exemple du maïs. C'est un polymère bio-dégradable qui présente une excellente alternative aux polymères synthétiques d'origine du pétrole.

Le polyamide (PA11) : le Polyamide 11 est un polymère issu également de la biomasse. Il est extrait exclusivement de l'huile de ricin. Par contre, par opposition au PLA, il n'est pas bio-dégradable.



Figure 4. 2. Les différents types de résines mises en œuvre sous forme de fibres dans la fabrication des composites

4.2.2.3. Procédé de fabrication des biocomposites

Le procédé de fabrication des matériaux qui a été utilisé, consiste à réaliser dans un premier temps des nontissés sous forme de mélange entre les fibres naturelles (renfort) et les

fibres thermoplastiques (résines). Puis dans un deuxième temps, la compression du nontissé tout en augmentant la température pour faire fondre le polymère et créer ainsi les matériaux composites.

a) Fabrication des nontissés

Les nontissés sont réalisés sur ligne pilote de masse surfacique proche de 1500 g/m². Lors de la conception, plusieurs produits nontissés ont été développés avec des mélanges en masse de fibre de renfort (lin) et de résine polymère. Les produits résultants sont les structures aiguilletées, qui ont été utilisées pour la réalisation des composites.

b) Fabrication des biocomposites par thermo-compression

Les structures composites sont réalisées en fondant les fibres polymères dans le nontissé tout en appliquant une certaine pression. L'opération consistait à insérer les produits nontissés dans une presse préalablement chauffé à 200°C. Ensuite une pression de l'ordre de 75 bars est appliquée pendant une durée de 9 minutes. Les composites sont réalisés sous une épaisseur de 1,5mm et de 2mm. Le choix de ces épaisseurs était effectué pour être en cohérence avec les dimensions des composites réalisés en industrie. La Figure 4.3 présente le procédé de la fabrication des composites par thermo-compression. Les composites sont référencés BC plus un indice.

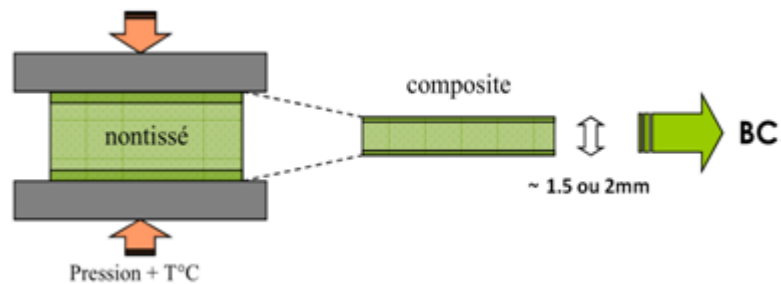


Figure 4. 3. Procédé de fabrication des composites par thermo-compression

4.3. Méthodes de caractérisation des matériaux composites

Afin de caractériser les matériaux composites, une étude en comportement mécanique en traction, flexion et impact des composites pour caractériser les performances des produits. Pour chaque comportement, une norme, qui précise les conditions opératoires du test, a été suivie. Les propriétés acoustiques ont été aussi étudiées, afin d'élargir le domaine d'application des produits. A l'aide des résultats obtenus, nous avons défini le modèle pour analyser les produits biocomposites et identifier les différents facteurs qui influent sur les résultats.

4.3.1. Résistances mécaniques

4.3.1.1. Contrainte de traction

Les tests de traction sont effectués en suivant la norme NF EN ISO 527 sur un banc de traction MTS.

Le calcul de la contrainte de traction est donné par la formule suivante :

$$\sigma(MPa) = \frac{F(N)}{S(mm^2)} \quad (4.1)$$

Avec S est la surface sollicitée en mm^2
 F la force appliquée en N
 σ la contrainte en MPa

Pour répondre aux exigences du cahier des charges par rapport aux besoins des concepteurs, au développement de produits biocomposites, une fonction d'acceptabilité a été définie (Figure 4.4). Trois classes correspondant aux différentes modalités du critère de qualité, contrainte à la traction ont été proposées :

- C_{11} / Très acceptable : Grande contrainte traction [35, 80]
- C_{12} / Acceptable : Moyenne contrainte traction]25, 35[
- C_{13} / Non acceptable : Petite contrainte traction [0, 20]

L'objectif est de maximiser la contrainte à la traction (classe C_{11}).

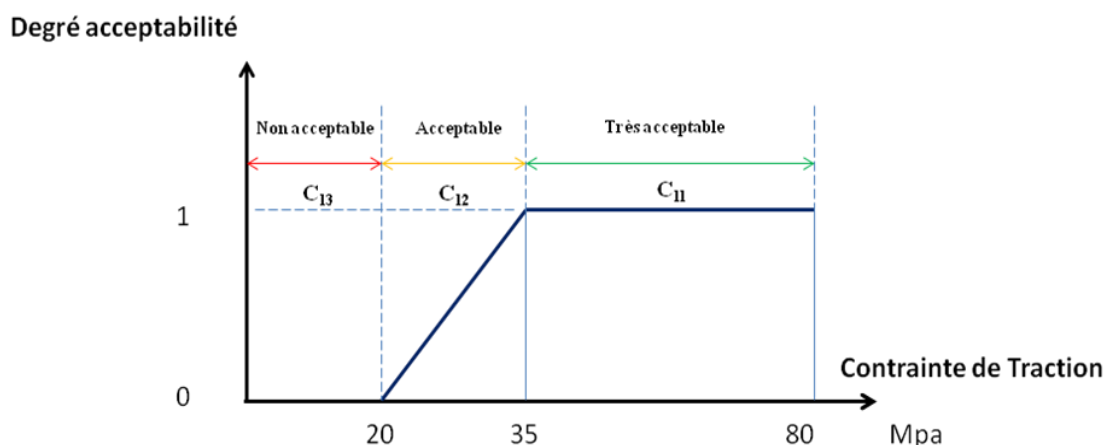


Figure 4. 4. Fonction d'acceptabilité associée au critère qualité « *Contrainte de traction* »

4.3.1.2. Module en flexion

Les tests de flexion sont réalisés en suivant la norme NF EN ISO 14125.
Le calcul du module en flexion est donné par la formule suivante :

Module en flexion (MPa) :

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (4.2)$$

Avec

p : la force appliquée en Newton. Elle est donnée par le logiciel.

l : longueur de l'éprouvette entre les deux points de flexion de l'outil. Constante de 64mm.

b : largeur de l'éprouvette. Constante de 10mm.

h : épaisseur de l'éprouvette qu'il faut mesurer en mm.

w_c : traverse (mm) associé à la force max en Newton.

Une fonction d'acceptabilité est aussi définie par les experts pour le critère module en flexion (Figure 4.5). Trois classes correspondant aux différentes modalités de la variable ont été proposées :

- C_{21} / Très acceptable : Grand module flexion [3000, 5000]
- C_{22} / Acceptable : Moyen module en flexion [1500, 3000]
- C_{23} / Non acceptable : Petit module en flexion [0, 1500].

L'objectif est de maximiser la flexion (C_{21}).

Degré d'acceptabilité

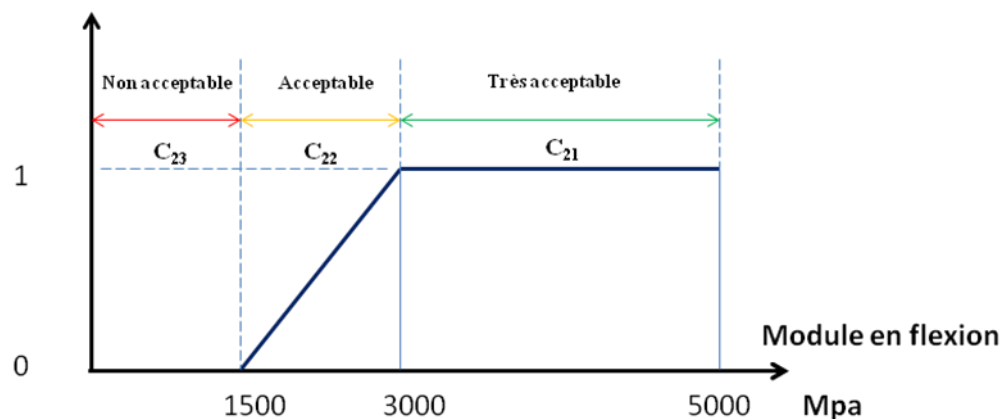


Figure 4. 5. Fonction d'acceptabilité associée au critère qualité « *Module en flexion* »

4.3.1.3. Résistance au choc (Impact)

Pour les tests de la résistance au choc, la norme NF EN ISO 180 a été suivie pour dimensionner les éprouvettes.

Le calcul de la résistance au choc izod (J/m^2) est donné par la formule ci-dessous:

Résistance au choc izod en J/m^2 :

$$a_{iv} = \frac{E_c}{bh} \times 10^3 \quad (4.3)$$

avec :

E_c : l'énergie en J absorbée lors de l'impact.

h : l'épaisseur de l'éprouvette en mm

b : largeur de l'éprouvette en mm

L'énergie absorbée E_c est déduite à partir des résultats obtenus : 1 joule = 10 Kg_f.cm
 Une fonction d'acceptabilité est également définie par les experts pour le critère résistance au choc (Figure 4.6). Trois classes correspondant aux différentes modalités de la variable ont été proposées :

- C_{31} / Très acceptable : Grande résistance au choc [20, 40]
- C_{32} / Acceptable : Moyenne résistance au choc]10, 20[
- C_{33} / Non acceptable : Petite résistance au choc [0, 10].

L'objectif est de maximiser la résistance au choc (C_{31}).

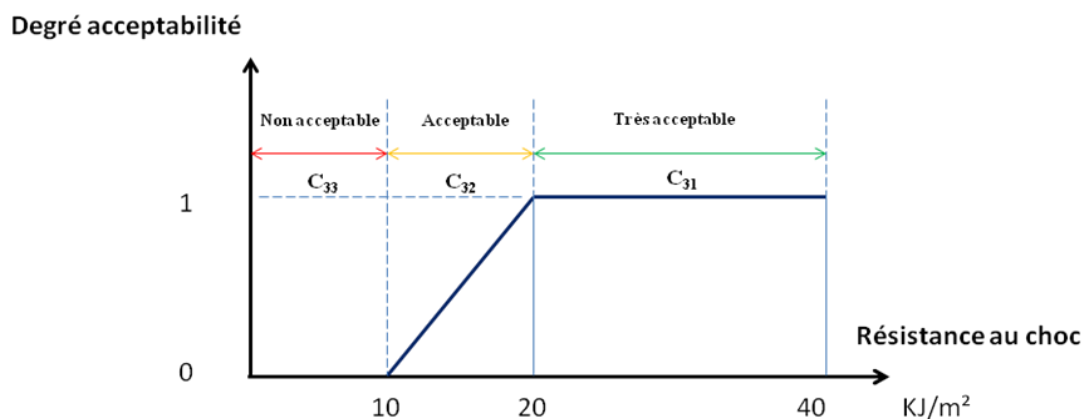


Figure 4. 6 . Fonction d'acceptabilité associée au critère qualité « *Résistance au choc* »

4.3.2. Propriétés acoustiques : absorption acoustique

L'absorption acoustique représente la capacité d'un matériau à transformer une partie de l'onde sonore en énergie dissipée à l'intérieur du matériau. La mesure du coefficient d'absorption acoustique est réalisée via un tube d'impédance de type 4206 (Bruel & Kjaer) (Figure 4.7) suivant la norme ISO 10534-2 et ASTM E 1050. Le test consiste à émettre des ondes sur l'éprouvette insérée dans le tube, et de calculer la différence entre l'onde émise et réfléchi. Il nous a permis de mesurer le coefficient d'absorption des produits en fonction de la fréquence en Hz.

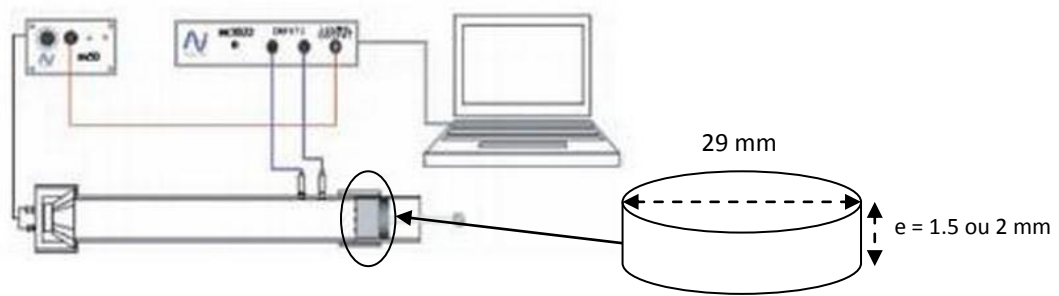


Figure 4. 7. Mesure du coefficient d'absorption acoustique

Une autre fonction d'acceptabilité est aussi définie par les experts pour le critère absorption acoustique (Figure 4.8). Trois classes correspondant aux différentes modalités de la variable ont été proposées :

- C_{41} / Très acceptable : Grande absorption acoustique [25, 100]
- C_{42} / Acceptable : Moyenne absorption acoustique]15, 25[
- C_{43} / Non acceptable : Petite absorption acoustique [0, 15]

L'objectif est de maximiser l'absorption acoustique (C_{41})

Degré d'acceptabilité

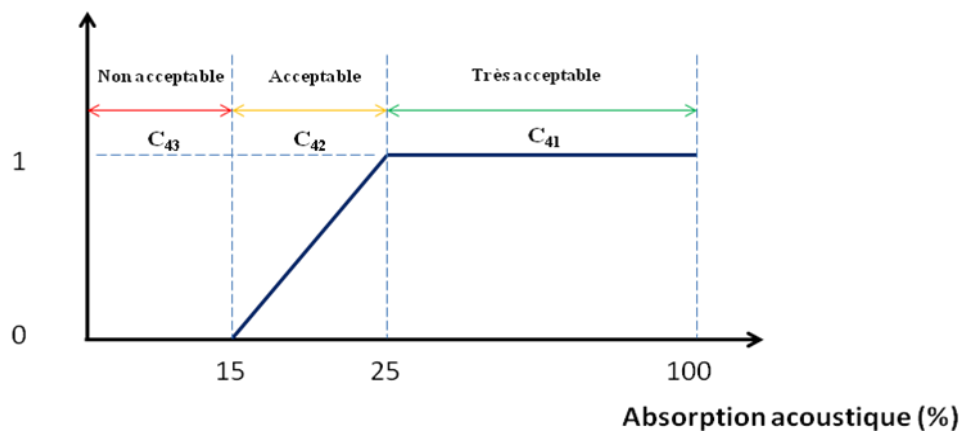


Figure 4. 8. Fonction d'acceptabilité associée au critère qualité « Absorption acoustique »

4.4. Etude de l'influence des paramètres de structure (facteurs de conception)

Nous allons maintenant appliquer le système d'aide à la conception pour étudier l'influence des paramètres de structure ou des facteurs de conception sur les biocomposites. Pour cela et à l'aide des experts nous avons défini le modèle de la figure 4.9. Sept variables d'entrées ont été retenues pour cette étude correspondant aux facteurs de conception. En effet lors de l'étude, les experts ont constaté que ces paramètres sont des facteurs qui influent sur les paramètres mécaniques et acoustiques des matériaux composites : « Type fibre de résine » qui assure la forme du produit, la tenue des fibres et la transmission des efforts. « Type fibre de renfort » qui assure la résistance aux efforts et participe à la rigidité. « Epaisseur du

composite (mm) », « Densité du composite (kg/m^3) », « Porosité (%) », « Fraction volumique des fibres renfort (%) » et « Fraction volumique des fibres résine (%) ». Les trois derniers paramètres sont calculés suivant les formules ci-dessous:

Fraction volumique des fibres de renfort:

$$v_f = \frac{\text{Masse Volumique du composite (Kg/m}^3)}{\text{Densité du lin } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) * 10^3} * \% \text{ fibre de lin} \quad (4.4)$$

Fraction volumique des fibres résine:

$$v_m = \frac{\text{Masse Volumique du composite (Kg/m}^3)}{\text{Densité fibre résine } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) * 10^3} * \% \text{ fibre résine} \quad (4.5)$$

Porosité:

$$\text{Porosité}(\%) = 1 - v_m - v_f \quad (4.6)$$

En sortie du modèle nous retrouvons les résistances mécaniques et les propriétés acoustiques comme critères de qualité. Comme nous pouvons le constater dans notre étude, le « type de fibre de résine » et « type de fibre de renfort » sont des variables nominales alors que les autres variables sont numériques.

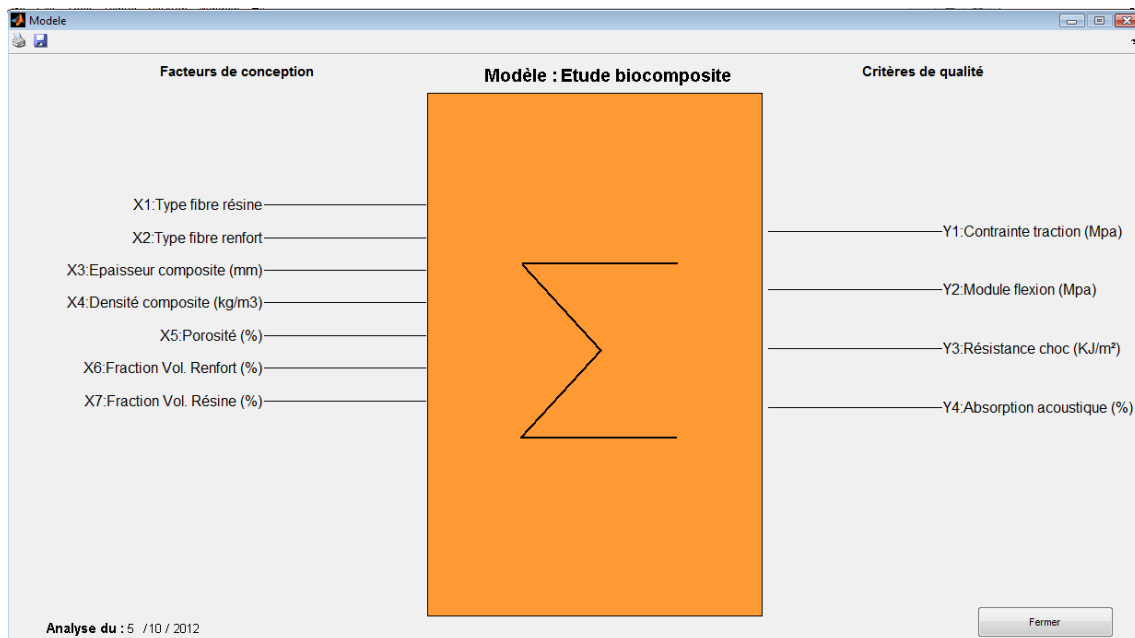


Figure 4. 9. Modèle proposé pour l'analyse des biocomposites

4.4.1. Etudes des corrélations et des correspondances entre les variables

Une fois le modèle défini, on pourra lancer les différents outils du système d'aide à la conception pour le développement de nouveaux produits. Dix prototypes biocomposites ont été utilisés (Annexe E et E). En premier lieu on va étudier les corrélations des variables, pour cela on a tracé l'ACP associé aux facteurs de conception et aux critères de qualité (Figure 4.10). Pour les variables nominales : « *type de fibre de résine* » et « *type de fibre de renfort* », une codification numérique est utilisée afin de générer l'ACP. Par exemple, la prise en compte du « *type de fibre de résine* » est réalisée ainsi : « *1 pour PP* », « *2 pour PLA* » et « *3 pour PA11* ». Idem pour la variable « *type de fibre de renfort* ».

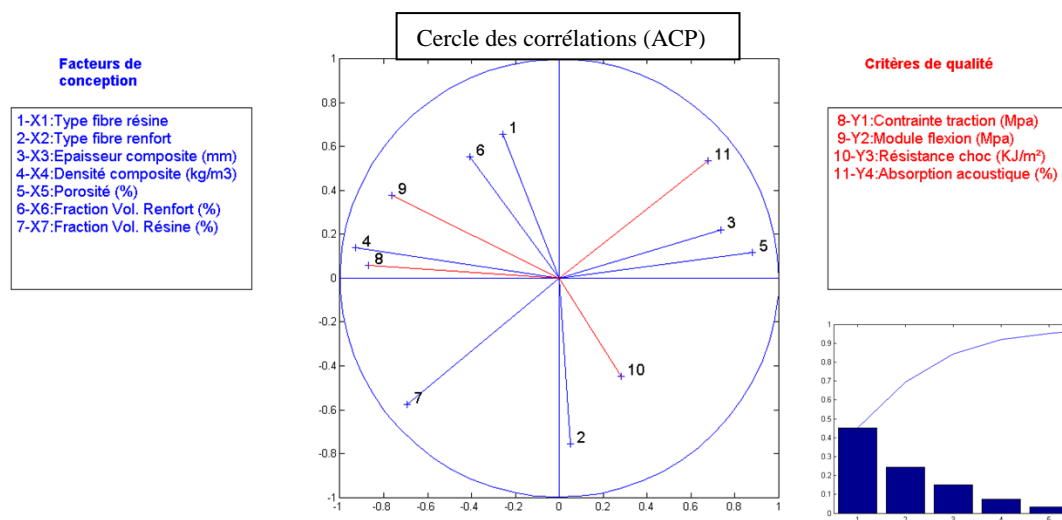


Figure 4. 10. ACP associée a l'étude des biocomposites

L'ACP (Avec un taux d'explication de 60% selon les deux axes), nous permet de constater qu'on a une forte corrélation positive entre la contrainte à la traction et le module flexion, ainsi nous pourrions supprimer une de ces variables pour simplifier l'analyse et l'interprétation des résultats. Pour notre étude nous allons garder la contrainte à la traction et le choc comme contraintes mécaniques. Même phénomène est constaté entre l'épaisseur et la porosité, dans la suite de l'étude on va garder l'épaisseur comme facteurs de conception. Nous remarquons aussi, qu'on a une corrélation négative entre l'absorption acoustique et la fraction volumique résine, ou aussi entre la résistance au choc et la fraction volumique renfort, deux corrélations qui semblent correctes d'après les experts du domaine, et qui permettent de mieux comprendre le comportement de ces matériaux par rapport aux critères définis. Par contre d'autres corrélations sont moins évidentes en particulier pour les variables nominales, encore une fois l'étude montre l'importance d'utiliser ce type de variable dans leur forme originale pour une meilleure interprétation des résultats.

Pour étudier maintenant les correspondances entre les variables nominales du modèle (« type de fibre de résine » et « type de fibre de renfort »), on a tracé l'ACM associée à chaque variable qualitative. Des informations sur des tendances a priori peuvent être obtenues à partir de ces graphes, par exemple nous constatons que nous obtenons généralement des performances acoustiques faibles en utilisant des résines de type PP (Figure 4.11), et de bonnes performances en contrainte à la traction (Figure 4.12), et de très bonne performance en résistance au choc (Figure 4.13). Nous pouvons observer aussi que les fibres de renfort : fibre de verre, lin affiné et lin filasse 120, donnent des valeurs d'absorption acoustique faibles. Par contre, d'une part les autres correspondances ne sont pas évidentes à expliquer, et d'autre part ces correspondances ne sont pas trop précises (nous ne pourrions pas connaître l'ordre exact de la pertinence des fibres). Ainsi, il est nécessaire d'utiliser les autres méthodes proposées pour le traitement des variables qualitatives, pour avoir plus de précision sur les résultats et une meilleure explication du comportement de ces produits. Pour cela nous allons dans la suite, étudier la sélection des facteurs de conception les plus pertinents.

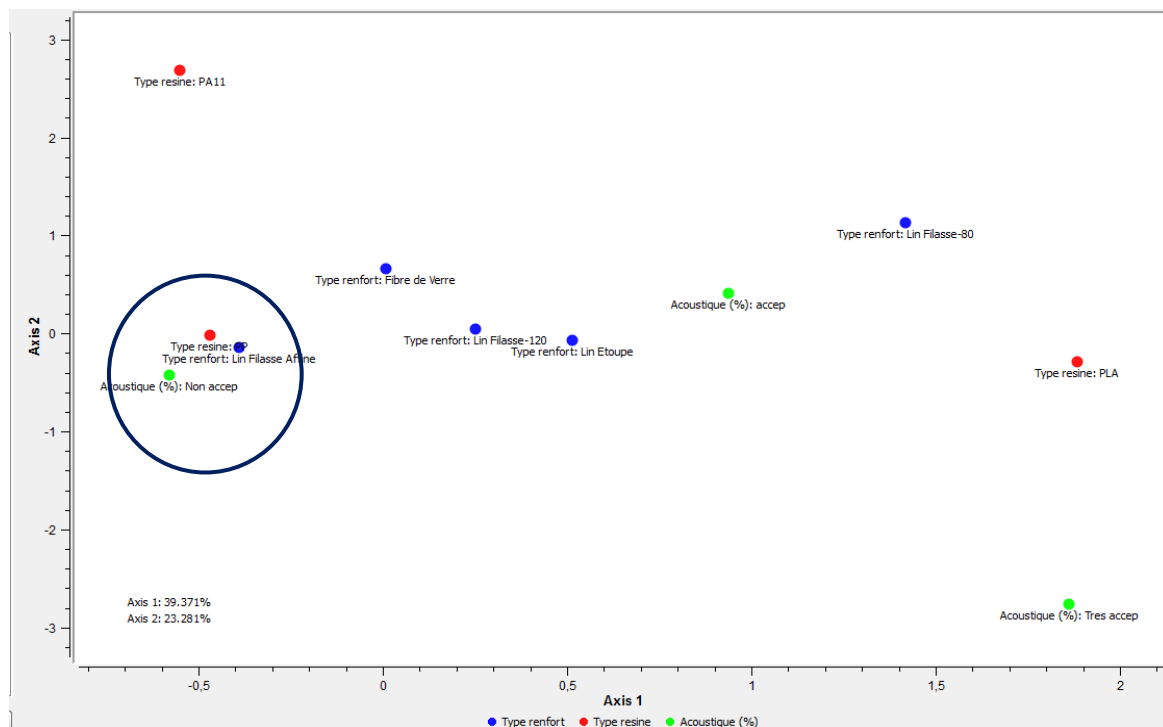


Figure 4. 11. ACM pour étudier les correspondances entre type de résine et type de renfort par rapport à l'absorption acoustique

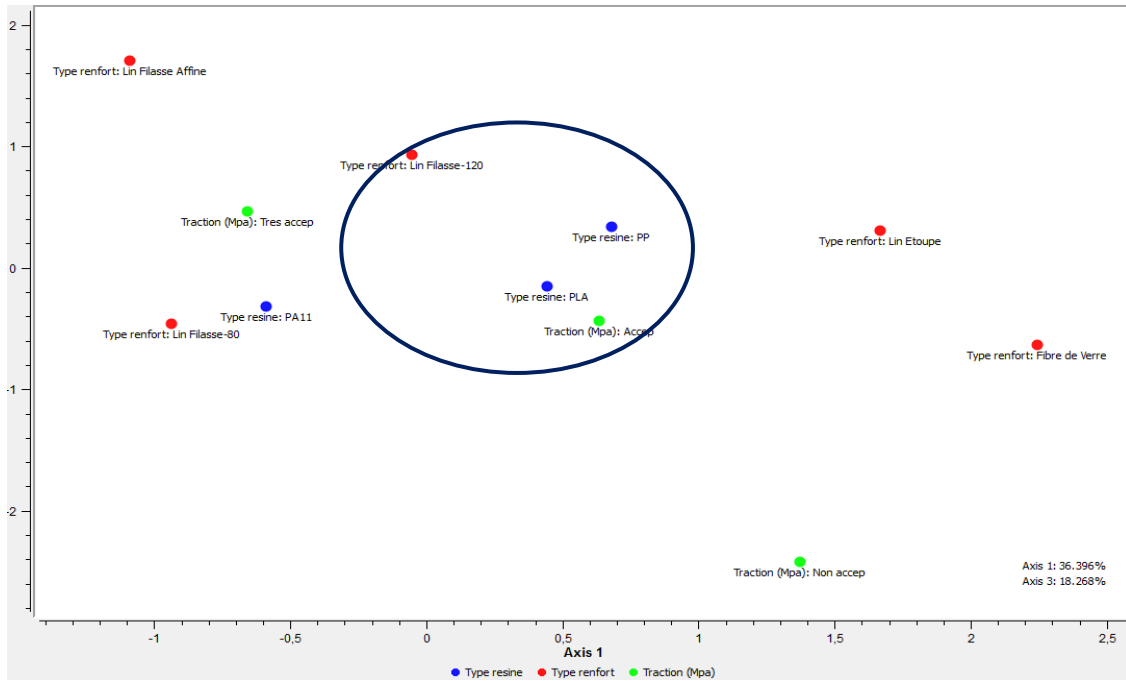


Figure 4. 12. ACM pour étudier les correspondances entre type de résine et type de renfort par rapport à la contrainte à la traction

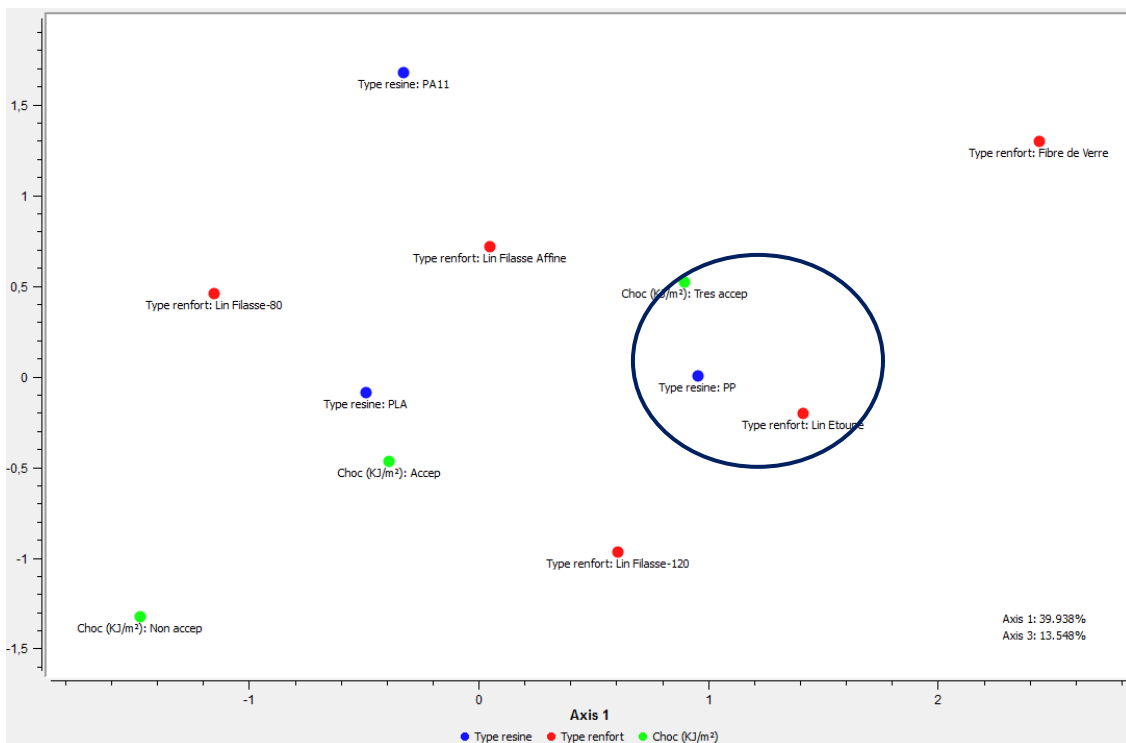


Figure 4. 13. ACM pour étudier les correspondances entre type de résine et type de renfort par rapport à la résistance au choc

4.4.2. Analyse de sensibilité et de pertinence des facteurs de conception

Afin d'analyser et mesurer la sensibilité des facteurs de conception les plus pertinents pour le développement des produits biocomposites, nous avons appliqué l'outil 1 pour calculer la sensibilité floue pour chaque facteur. Comme dans l'étude précédente nous constatons, que cette méthode n'est pas applicable sur les variables qualitatives, ainsi nous avons appliqué la méthode basée sur les arbres de décision, en prenant en considération toutes les variables simultanément, qu'elles soient numériques ou nominales.

Les figures 4.14, 4.15 et 4.16 montrent respectivement l'arbre de décision générés pour les variables de sortie absorption acoustique, traction et choc.

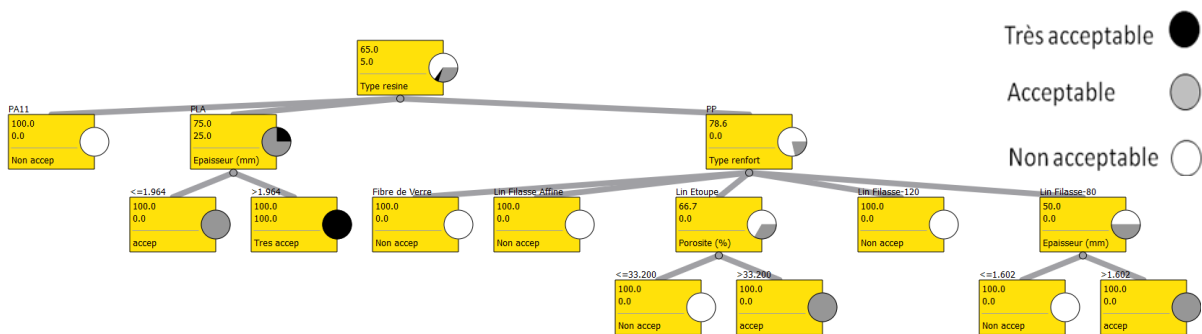


Figure 4. 14. Arbre de décision pour le critère de qualité « absorption acoustique » par rapport à la classe cible « très acceptable »

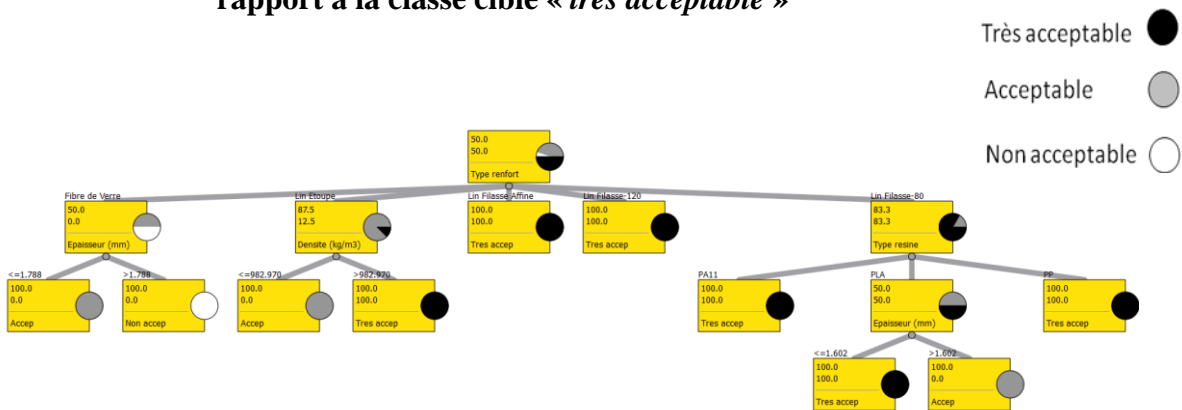


Figure 4. 15. Arbre de décision pour le critère de qualité « contrainte traction » par rapport à la classe cible « très acceptable »

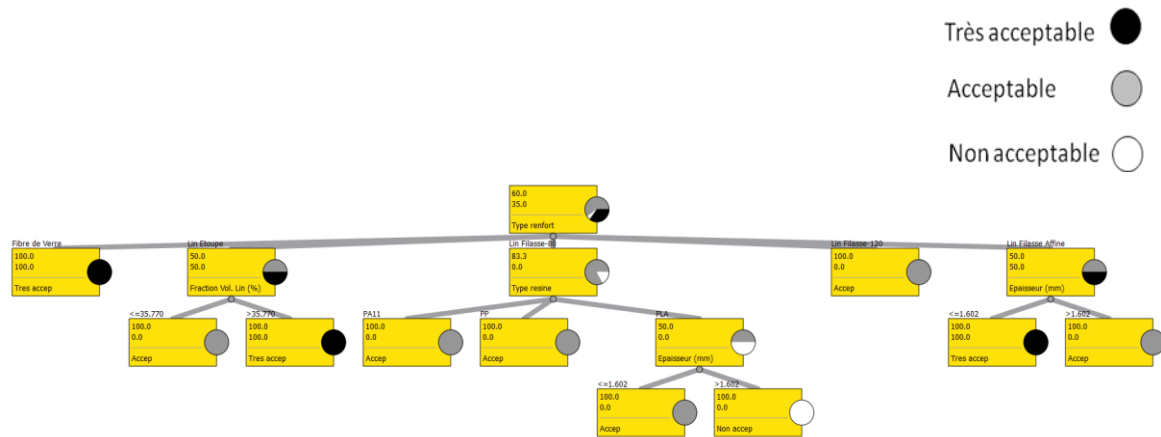


Figure 4. 16. Arbre de décision pour le critère de qualité « Résistance choc » par rapport à la classe cible « très acceptable »

A partir des arbres de décisions générés, sont extraits les degrés de pertinence des variables. Les tableaux 4.1, 4.2 et 4.3 présentent les résultats de comparaison entre la méthode de sensibilité floue et celle issue des arbres de décision pour chacune des variables de sortie « absorption acoustique », « contrainte traction » et « résistance choc ». Les variables sont classés par ordre de pertinence décroissant. Rappelons que la méthode sensibilité floue ne prend pas en charge les variables nominales (« Type fibre de résine » et « Type fibre de renfort » non classées).

Tableau 4. 1. Comparaison des résultats des méthodes sensibilité floue et arbre de décision pour la variable « Absorption acoustique »

| Sensibilité floue (valeur floue) | | Ordre | Arbre de décision | Ordre |
|----------------------------------|--------|-------|--|-------|
| Type fibre de résine | | nc* | Type fibre de résine | 1 |
| Type fibre de renfort | | nc | Type fibre de renfort, Epaisseur | 2 |
| Epaisseur (mm) | 1 | 1 | Porosité | 3 |
| Fraction volumique résine (%) | 0.9935 | 2 | Densité, Fraction volumique résine, Fraction volumique renfort | 4 |
| Fraction volumique renfort(%) | 0.0188 | 3 | | |
| Porosité (%) | 0.0159 | 4 | | |

(*) nc = non classé

Tableau 4. 2. Comparaison des résultats des méthodes sensibilité floue et arbre de décision pour la variable « Contrainte traction »

| Sensibilité floue (valeur floue) | | Ordre | Arbre de décision | Ordre |
|----------------------------------|--------|-------|---|-------|
| Type fibre de résine | | nc* | Type fibre de renfort | 1 |
| Type fibre de renfort | | nc | Type fibre de résine, Epaisseur, Densité | 2 |
| Epaisseur (mm) | 1 | 1 | Porosité, Fraction volumique résine, Fraction volumique renfort | 3 |
| Fraction volumique Résine (%) | 0.8401 | 2 | | |
| Fraction volumique renfort (%) | 0.825 | 3 | | |
| Porosité (%) | 0.7289 | 4 | | |

(*) nc = non classé

Tableau 4. 3. Comparaison des résultats des méthodes sensibilité floue et arbre de décision pour la variable « Résistance choc »

| Sensibilité floue (valeur floue) | | Ordre | Arbre de décision | Ordre |
|----------------------------------|--------|-------|---|-------|
| Type fibre de résine | | nc* | Type fibre de renfort | 1 |
| Type fibre de renfort | | nc | Fraction volumique renfort, Type fibre de résine, Epaisseur | 2 |
| Epaisseur (mm) | 1 | 1 | Porosité, Densité, Fraction volumique résine | 3 |
| Fraction volumique résine (%) | 0.9935 | 2 | | 4 |
| Fraction volumique renfort (%) | 0.0196 | 3 | | |
| Porosité (%) | 0.0177 | 4 | | |

(*) nc = non classé

D'après les tableaux de comparaison, nous constatons que la méthode de sensibilité floue considère toujours les deux variables « Epaisseur » et « Fraction volumique résine » comme les facteurs de conception les plus sensibles pour les trois critères de qualité. Un résultat relativement logique, mais pas pour la « Porosité » (toujours en dernière position avec de très faibles valeurs floues), alors que ce dernier a un rôle prépondérant sur les propriétés mécaniques et acoustiques d'un côté, et d'un autre côté les résultats de la sensibilité floue montrent que l'on n'a aucune corrélation entre « Epaisseur » et « Porosité », un résultat qui semble non logique d'après les experts du domaine. Nous constatons aussi, que nous obtenons un grand écart des valeurs floues, en particulier pour le critère qualité « Résistance choc »

(valeur floue ≈ 1 pour les facteurs « *Epaisseur* » et « *Fraction volumique résine* » et valeur floue ≈ 0.02 pour les facteurs « *Fraction volumique renfort* » et « *Porosité* ». Idem pour le critère « *Absorption acoustique* ».

Contrairement aux résultats obtenus avec les arbres de décision, nous remarquons, que les variables nominales « *Type fibre de renfort* » et « *Type fibre de résine* » présentent les variables les plus pertinents pour les trois critères de qualités, « *Absorption acoustique* », « *Contrainte traction* » et « *Résistance choc* ». Un résultat qui semble très cohérent avec l'avis des experts, vu les différentes propriétés associées aux fibres utilisées en terme de résistances mécaniques ou absorption acoustique. Les résultats de l'arbre de décision confirment aussi la pertinence du facteur « *Epaisseur* », ce qui explique sa deuxième position, en particulier pour l'absorption acoustique. Et sa corrélation avec le facteur « *Porosité* » (en troisième position). D'après les résultats de l'arbre de décision, nous apercevons encore une fois, l'importance de la prise en compte des variables nominales dans l'analyse des résultats, pour une meilleure compréhension du comportement des produits.

4.4.3. Etude de performance du type de résine et du type de renfort

Les arbres de décision nous permettent aussi de classer la performance de chaque type de résine ou de renfort pour chaque variable de sortie. Ce classement est basé sur la probabilité P_{ij} (probabilité de la classe cible), la classe correspondant à la valeur du critère de qualité la plus favorisée par l'utilisateur, en occurrence ici, la classe « *Très acceptable* ».

4.4.3.1. Etude de performance du type de résine

Nous allons dans un premier temps, étudier la performance du type de résine sur les produits biocomposites. La performance est générée à partir de la probabilité de la classe cible P_{ij} (classe correspondant à la valeur du critère de qualité la plus favorisée par l'utilisateur), c'est-à-dire, plus le taux du nombre d'échantillons appartenant à une classe C_{ij} en occurrence ici la classe « *Très acceptable* », par rapport au nombre total est grand, plus le type de résine est performant. Les figures 4.17, 4.18 et 4.19 présentent respectivement le classement de la performance en fonction de la probabilité d'appartenance du type de résine par rapport aux trois variables de sortie acoustique, traction et choc.

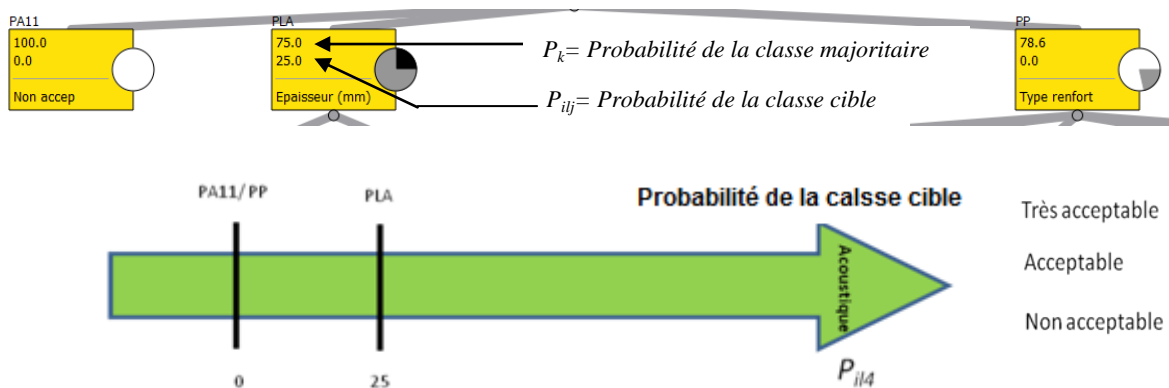


Figure 4. 17. Classement de performance des types de résine par rapport à la sortie « *Absorption acoustique* » (classe cible « *Très acceptable* »)

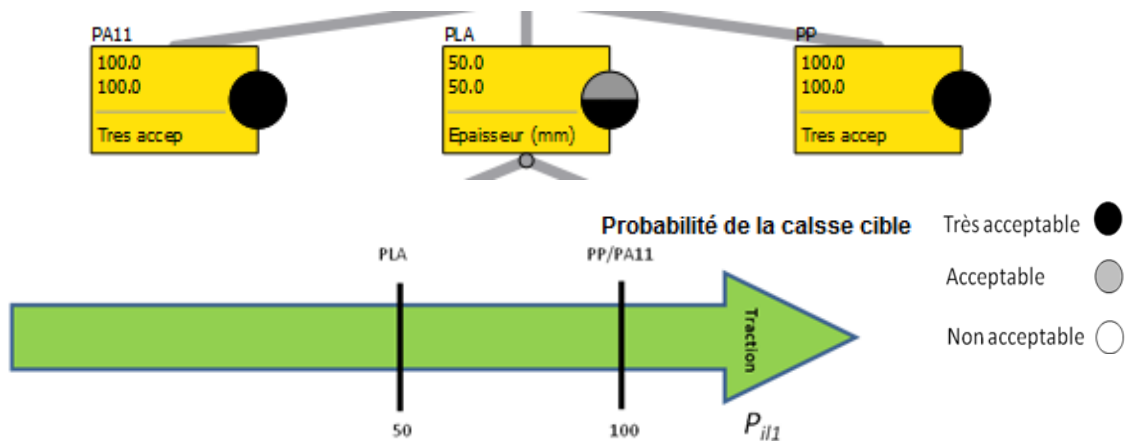


Figure 4. 18. Classement de performance des types de résine par rapport à la sortie « Contrainte traction » (classe cible « Très acceptable »)

Pour la variable de sortie « Résistance au choc », nous avons défini la classe « Acceptable » comme classe cible, vu qu'il n'y a aucun produits qui répond à la classe « Très acceptable ».

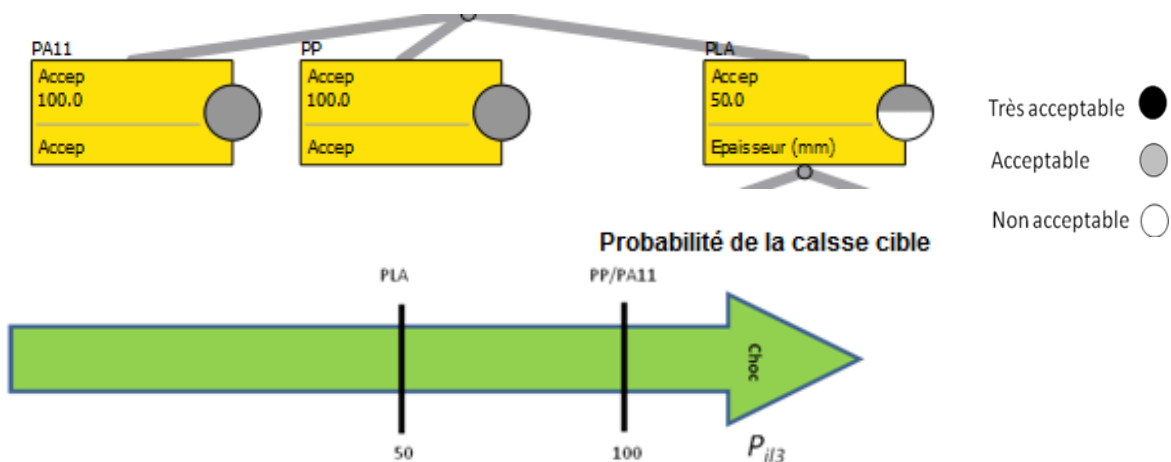


Figure 4. 19. Classement de performance des types de résine par rapport à la sortie « Résistance choc » (classe cible « Acceptable »)

D'après les arbres de décision des figures 4.17, 4.18 et 4.19, les règles pertinentes pour obtenir les valeurs maximales des variables de sorties sont données comme suit:

Pour la sortie « Absorption acoustique » :

R_{42} : SI (Type résine \in {PLA}) ET (Epaisseur $>$ 1.96) ALORS Acoustique = { $\langle C_{41}, 25\% \rangle$, $\langle C_{42}, 75\% \rangle$, $\langle C_{43}, 0\% \rangle$ }, avec des probabilités d'appartenance pour les classes C_{41} , C_{42} et C_{43} , égale respectivement à : $P_{114}=0.25$, $P_{124}=0.75$, $P_{134}=0$.

Pour la sortie « Contrainte traction » :

R_{110} : SI (Type résine $\in \{PA11\}$) ET (Type renfort $\in \{Lin\ filasse\ 80\}$) ALORS Traction = $\{<C_{11}, 100\%>, <C_{12}, 0\%>, <C_{13}, 0\%>\}$, avec des probabilités d'appartenance pour les classes C_{11} , C_{12} et C_{13} , égale respectivement à : $P_{111}=1$, $P_{121}=0$, $P_{131}=0$.

R_{111} : SI (Type résine $\in \{PLA\}$) ET (Type renfort $\in \{Lin\ filasse\ 80\}$) ALORS Traction = $\{<C_{11}, 50\%>, <C_{12}, 50\%>, <C_{13}, 0\%>\}$, avec des probabilités d'appartenance pour les classes C_{11} , C_{12} et C_{13} , égale respectivement à : $P_{111}=0.50$, $P_{121}=0.50$, $P_{131}=0$.

R_{112} : SI (Type résine $\in \{PP\}$) ET (Type renfort $\in \{Lin\ filasse\ 80\}$) ALORS Traction = $\{<C_{11}, 100\%>, <C_{12}, 0\%>, <C_{13}, 0\%>\}$, avec des probabilités d'appartenance pour les classes C_{11} , C_{12} et C_{13} , égale respectivement à : $P_{111}=1$, $P_{121}=0$, $P_{131}=0$.

Pour le sortie « Résistance au choc » :

R_{38} : SI (Type résine $\in \{PA11\}$) ET (Type renfort $\in \{Lin\ filasse\ 80\}$) ALORS Traction = $\{<C_{31}, 100\%>, <C_{32}, 0\%>, <C_{33}, 0\%>\}$, avec des probabilités d'appartenance pour les classes C_{31} , C_{32} et C_{33} , égale respectivement à : $P_{113}=1$, $P_{123}=0$, $P_{133}=0$.

R_{39} : SI (Type résine $\in \{PLA\}$) ET (Type renfort $\in \{Lin\ filasse\ 80\}$) ALORS Traction = $\{<C_{31}, 50\%>, <C_{32}, 50\%>, <C_{33}, 0\%>\}$, avec des probabilités d'appartenance pour les classes C_{11} , C_{12} et C_{13} , égale respectivement à : $P_{113}=0.50$, $P_{123}=0.50$, $P_{133}=0$.

R_{310} : SI (Type résine $\in \{PP\}$) ET (Type renfort $\in \{Lin\ filasse\ 80\}$) ALORS Traction = $\{<C_{31}, 100\%>, <C_{32}, 0\%>, <C_{33}, 0\%>\}$, avec des probabilités d'appartenance pour les classes C_{31} , C_{32} et C_{33} , égale respectivement à : $P_{113}=1$, $P_{123}=0$, $P_{133}=0$.

D'après les règles de décision, nous constatons d'abord que nous avons les mêmes règles de décision pour les deux variables de sorties : « Contrainte traction » et « Résistance choc ». Ce qui explique le même comportement de ces deux sorties. Nous pouvons ainsi, supprimer une de ces variables, pour la suite de l'étude nous allons nous intéressés à la variable « Contrainte traction ». Nous constatons par contre, le manque de précision de ces règles pour obtenir une qualité certaine, notamment pour les deux règles R_{42} et R_{111} . Pour cela, nous allons appliquer le deuxième modèle (cartes de Kohonen) pour raffiner ces règles. Nous devons d'abord formaliser une règle de la connaissance humaine fournis par un expert pour les deux variables de sortie « Absorption acoustique » et « Contrainte traction ». Les tableaux 4.4 et 4.5 présentent respectivement un exemple d'une connaissance humaine sur les biocomposites par rapport aux critères « Absorption acoustique » et « Contrainte traction ».

Tableau 4. 4. Exemple d'une connaissance humaine sur les biocomposites par rapport au critère de qualité « Absorption acoustique »

| Nom expert | Type résine | Epaisseur | Absorption acoustique |
|------------|-------------|-----------|-----------------------|
| Expert 1 | - | Grande | Grande |
| Expert 1 | - | Petite | - |

Tableau 4. 5. Exemple d'une connaissance humaine sur les bicomposites par rapport au critère de qualité « *Contrainte traction* »

| Nom expert | Type résine | Epaisseur | Densité matériau | Contrainte traction |
|------------|-------------|-----------|------------------|---------------------|
| Expert 1 | PP | Grande | Petite | Grande |
| Expert 1 | - | Grande | Grande | Moyen |

La figure 4.20 présente la carte de Kohonen associée au modèle pour la variable de sortie « *Contrainte traction* » par rapport au facteur de conception « *Epaisseur* ». Selon la carte de Kohonen, nous avons l'unité 1 comme classe majoritaire pour obtenir la valeur maximale de la variable de sortie $Y_1 = \max(\text{Contrainte traction})$, pour cette unité, les valeurs des facteurs de conception associées sont données comme suit : *Type renfort* $\in \{PLA\}$, *Type renfort* $\in \{Lin\ filasse\ 80\}$, *Epaisseur* = 1.5, *Densité* = 953, *Porosité* = 28.5, *FV* renfort* = 25.75 et *FV résine* = 45.75.

(*) *FV* : *Fraction volumique*.

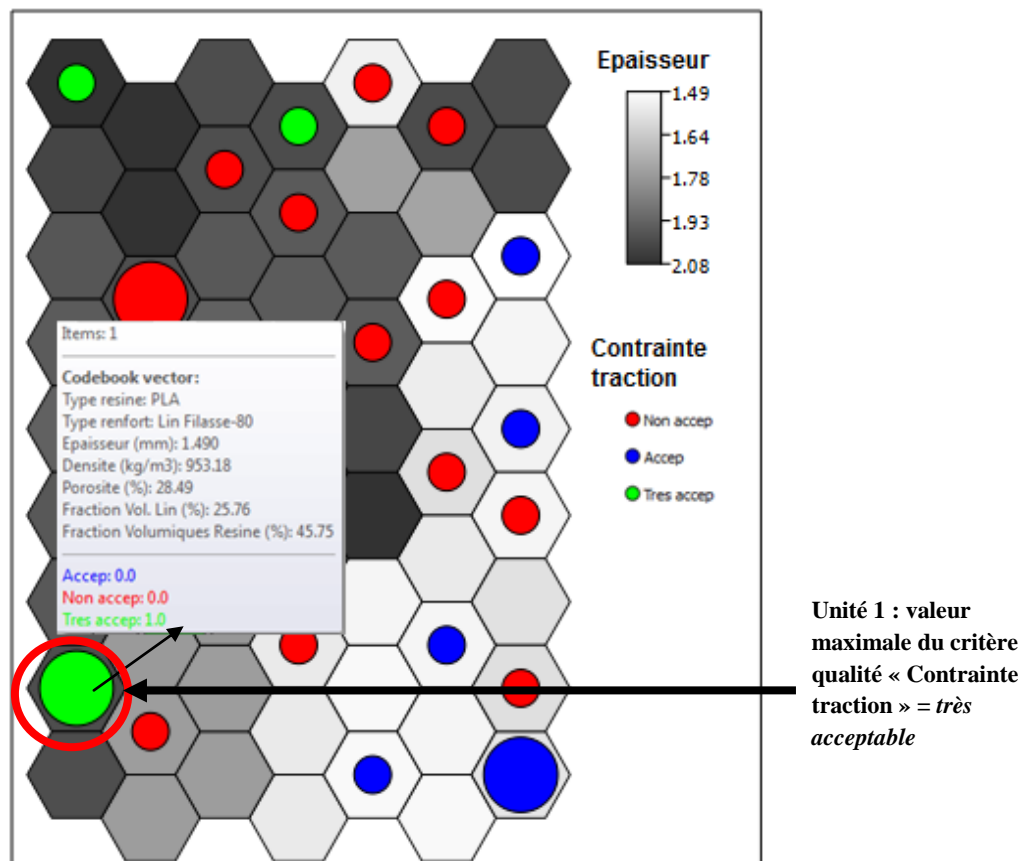


Figure 4. 20. Carte de Kohonen pour le facteur de conception « *Epaisseur* » par rapport au critère qualité « *Contrainte traction* »

Ainsi la règle R_{111} devient :

R_{111} : SI (Type résine $\in \{PLA\}$) ET (Type renfort $\in \{\text{Lin filasse } 80\}$) ET (Epaisseur = 1.5) ET (Densité = 953.2) ET (Porosité = 28.5) ET (FV renfort = 25.75) ET (FV résine = 45.75) ALORS Traction = $\{< C_{11}, 100\%>, < C_{12}, 0\%>, < C_{13}, 0\%>\}$

D'après la carte de Kohonen, nous observons, que généralement le type de résine PLA est le type de résine le mieux adapté au produit biocomposites, quand ce dernier est utilisé avec le type de renfort lin filasse 80 et avec une forte densité (faible épaisseur) et une faible porosité.

La figure 4.21 présente la carte de Kohonen associé au modèle pour la variable de sortie « Absorption acoustique » par rapport au facteur de conception « Epaisseur ». Selon la carte de Kohonen, nous obtenons une seule unité pour une valeur maximale de la variable de sortie $Y_4 = \max(\text{absorption acoustique})$. Pour cette unité, les valeurs des facteurs de conception associées sont données comme suit : Type renfort $\in \{PLA\}$, Type renfort $\in \{\text{Lin étoupe}\}$, Epaisseur = 2, Densité = 750.3, Porosité = 46.51, FV renfort = 35.49 et FV résine = 18.01

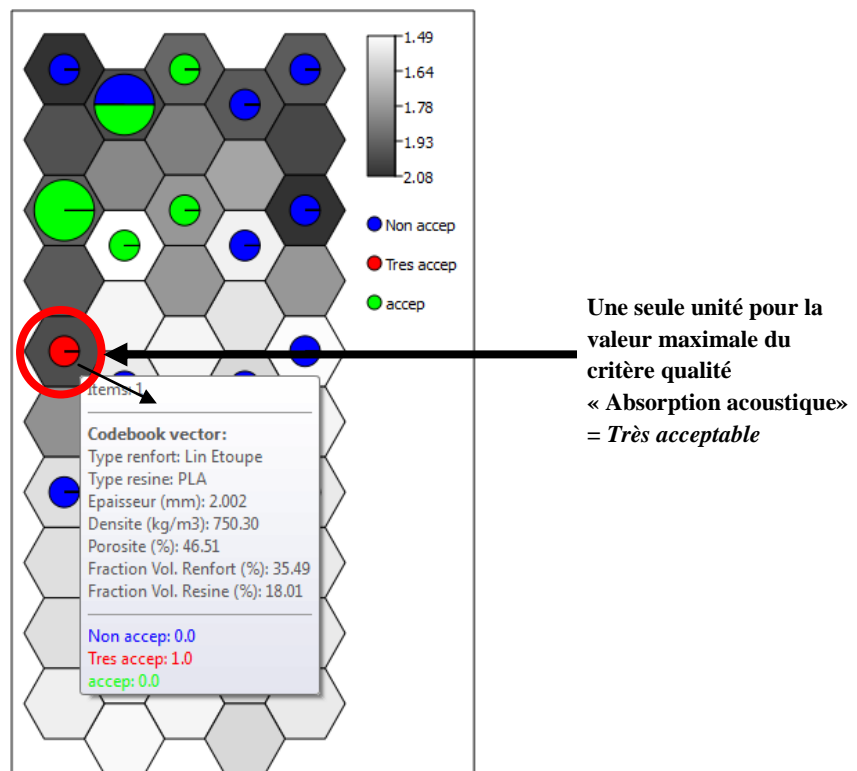


Figure 4. 21. Carte de Kohonen pour le facteur de conception « Epaisseur » par rapport au critère qualité « Absorption acoustique »

Ainsi la règle R_{42} devient :

R_{42} : SI (Type résine \in {PLA}) ET (Type renfort \in {Lin étoupe}) ET (Epaisseur = 2) ET (Densité = 750.3) ET (Porosité = 46.51) ET (FV renfort = 35.49) ET (FV résine = 18.01) ALORS Acoustique = {< C_{41} , 100%>, < C_{42} , 0%>, < C_{43} , 0%>}

Nous pouvons constater après le raffinement de la règle de décision, que le type de résine PLA donne de meilleure performance acoustique quand il est utilisé avec le lin en étoupe et avec des valeurs bien précis pour les propriétés structurales du produit : grande épaisseur, faible densité, faible fraction volumique résine.

Afin de valider et évaluer la performance des deux modèles, soit l'arbre de décision et la carte de Kohonen (SOM) par rapport aux deux variables de sorties, nous allons tracer la courbe ROC associé à chaque méthode, et calculer l'indicateur aire sous la courbe (AUC). Les figures 4.22 et 4.23 présentent respectivement la courbe de ROC pour le critère de qualité « *Contrainte traction* » et « *Absorption acoustique* ».

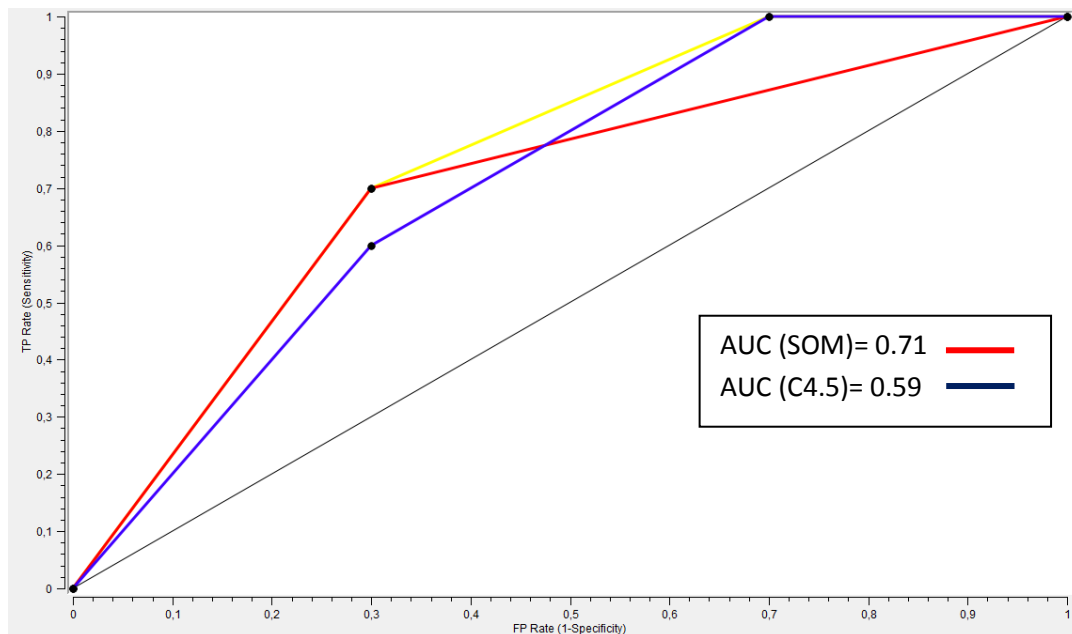


Figure 4. 22. Courbe ROC pour les deux modèles arbre de décision (C4.5) et carte de Kohonen (SOM) pour le développement produit par rapport à la sortie Y_1 (Contrainte traction / performance type résine)

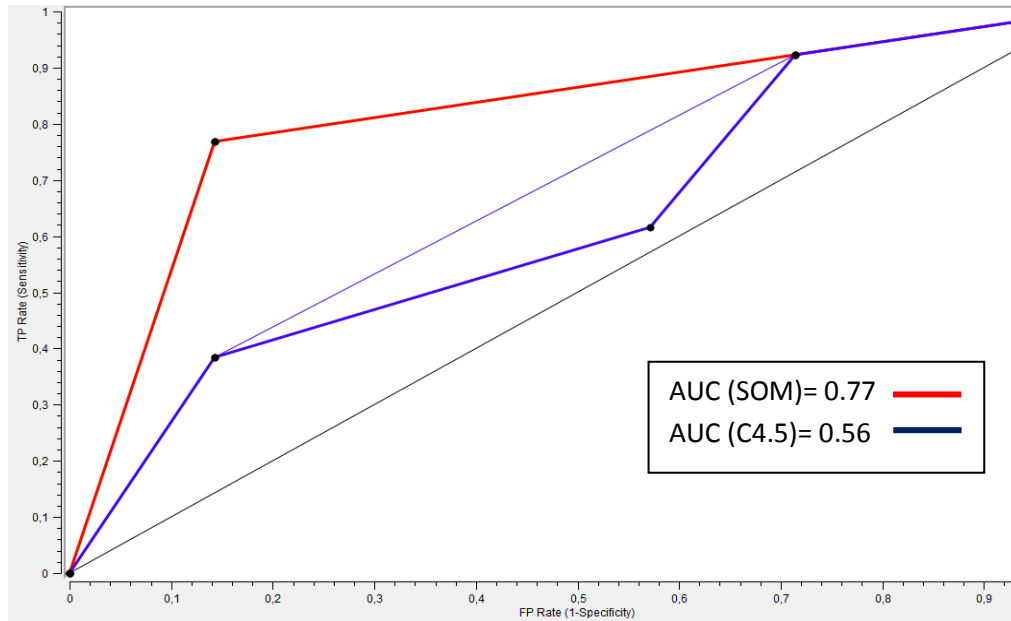


Figure 4. 23. Courbe ROC pour les deux modèles arbre de décision (C4.5) et carte de Kohonen (SOM) pour le développement produit par rapport a la sortie Y_4 (Absorption acoustique / performance type résine)

Les résultats obtenus pour les deux variables de sorties sont assez satisfaisants (valeur AUC respectivement pour la variable de sortie « *Contrainte traction* » et « *Absorption acoustique* » : 0.59 et 0.56 pour l'arbre de décision / 0.71 et 0.77 pour la carte de Kohonen). Les résultats de la carte de Kohonen, issus du raffinement des règles les plus pertinentes de l'arbre de décision, sont plus précis (plus proches de 1) que l'arbre de décision original.

4.4.3.2. Etude de performance du type de renfort

La même démarche a été appliquée pour étudier la performance des fibres de renfort sur les biocomposites. Les figures 4.24 et 4.25 présentent respectivement les arbres de décisions des critères de qualité « *Contrainte traction* » et « *Absorption acoustique* ».

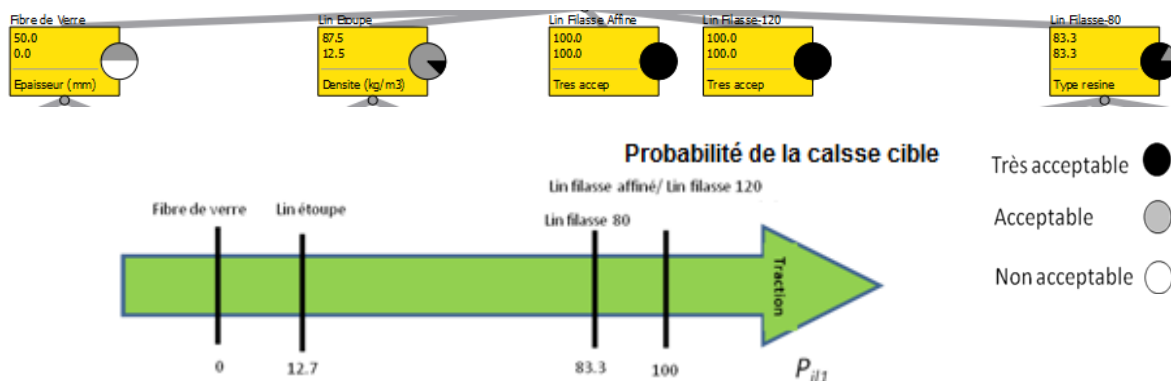


Figure 4. 24. Classement de performance des types de renfort par rapport à la sortie « *Contrainte traction* » (classe cible « *Très acceptable* »)

Afin d'étudier la performance des type de renfort pour le critère de qualité « *Absorption acoustique* », nous avons défini la classe « *Acceptable* » comme classe cible, vu qu'il n'y a aucun produits qui répond à la classe « *Très acceptable* ».

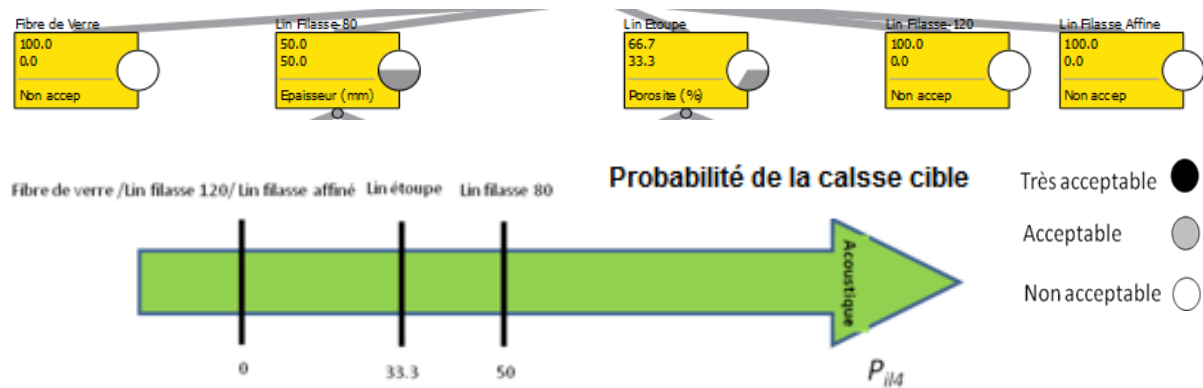


Figure 4. 25. Classement de performance des types de renfort par rapport à la sortie « *Absorption acoustique* » (classe cible « *Acceptable* »)

D'après les arbres de décision des figures 4.24 et 4.25, les règles pertinentes pour obtenir les valeurs maximales des critères de qualités : absorption acoustique et traction sont données comme suit:

Pour la variable « *Contrainte traction* » :

R_{12} : SI (Type renfort \in {Lin étoupe}) ALORS Traction = {<C₁₁, 12.5%>, <C₁₂, 87.5%>, <C₁₃, 0%>}, avec des probabilités d'appartenance pour les classes C₁₁, C₁₂ et C₁₃, égale respectivement à : P₁₁₁=0.12, P₁₂₁=0.87, P₁₃₁=0.

R_{13} : SI (Type renfort \in {Lin filasse affiné}) ALORS Traction = {<C₁₁, 100%>, <C₁₂, 0%>, <C₁₃, 0%>}, avec des probabilités d'appartenance pour les classes C₁₁, C₁₂ et C₁₃, égale respectivement à : P₁₁₁=1, P₁₂₁=0, P₁₃₁=0.

R_{14} : SI (Type renfort \in {Lin filasse 120}) ALORS Traction = {<C₁₁, 100%>, <C₁₂, 0%>, <C₁₃, 0%>}, avec des probabilités d'appartenance pour les classes C₁₁, C₁₂ et C₁₃, égale respectivement à : P₁₁₁=1, P₁₂₁=0, P₁₃₁=0.

R_{15} : SI (Type renfort \in {Lin filasse 80}) ALORS Traction = {<C₁₁, 83.3%>, <C₁₂, 16.7%>, <C₁₃, 0%>}, avec des probabilités d'appartenance pour les classes C₁₁, C₁₂ et C₁₃, égale respectivement à : P₁₁₁=0.83, P₁₂₁=0.16, P₁₃₁=0.

Pour la variable « *Absorption acoustique* » :

R_{48} : SI (Type renfort \in {Lin filasse 80} ET (Type résine \in {PP}) ALORS Acoustique = {<C₄₁, 0%>, <C₄₂, 50%>, <C₄₃, 50%>}, avec des probabilités d'appartenance pour les classes C₄₁, C₄₂ et C₄₃, égale respectivement à : P₁₁₄=0.5, P₁₂₄=0.5, P₁₃₄=0.5

R_{49} : SI (Type renfort \in {Lin étoupe} ET (Type résine \in {PP}) ALORS Acoustique = {<C₄₁, 0%>, <C₄₂, 33.3%>, <C₄₃, 66.7%>}, avec des probabilités d'appartenance pour les classes C₄₁, C₄₂ et C₄₃, égale respectivement à : P₁₁₄=0, P₁₂₄=0.33, P₁₃₄=0.66

Pour raffiner maintenant les règles de décisions générées : R_{48} et R_{49} pour la variable « *Absorption acoustique* » et R_{12} et R_{15} pour la variable « *Contrainte traction* ». Nous allons encore une fois utiliser les cartes de Kohonen des figures 4.20 et 4.21.

Pour la variable « *Absorption acoustique* », la carte de la figure 4.21 présente une seule cellule dont la valeur de l'absorption acoustique répond au cahier des charges qui correspond au raffinement de la règle R_{49} , par contre aucun raffinement n'est obtenu pour la règle R_{48} .

La règle R_{49} après raffinement devient :

R_{49} : SI (Type résine \in {PLA}) ET (Type renfort \in {Lin étoupe}) ET (Epaisseur = 1.78) ET (Densité = 883.06) ET (Porosité = 37.04) ET (FV renfort = 41.77) ET (FV résine = 21.19)
ALORS Acoustique = {< C_{41} , 0%>, < C_{42} , 100%>, < C_{43} , 0%>}

Pour la variable « *Contrainte traction* », les règles les plus pertinentes après raffinement seront :

R_{12} : SI (Type résine \in {PLA}) ET (Type renfort \in {Lin étoupe}) ET (Epaisseur=1.54) ET (Densité = 1008.08) ET (Porosité = 19.09) ET (FV renfort = 47.68) ET (FV résine = 33.23)
ALORS Traction = {< C_{11} , 100%>, < C_{12} , 0%>, < C_{13} , 0%>}

R_{15} : SI (Type résine \in {PA 11}) ET (Type renfort \in {Lin filasse 80}) ET (Epaisseur = 1.6) ET (Densité = 1058.73) ET (Porosité = 17.8) ET (FV renfort = 35.77) ET (FV résine = 46.47)
ALORS Traction = {< C_{11} , 100%>, < C_{12} , 0%>, < C_{13} , 0%>}

L'évaluation des deux modèles, arbre de décision et carte de Kohonen (SOM) par rapport aux deux variables de sorties « *Absorption acoustique* » et « *Contrainte traction* », grâce à la courbe ROC (Figure 4.26 et 4.27), montre que le modèle de SOM a très bien raffiné les règles de décision pour le critère de qualité « *Contrainte traction* » (valeur AUC : 0.59 pour l'arbre de décision et 0.77 pour la carte de Kohonen). Contrairement à l'autre critère de qualité « *Absorption acoustique* », où le deuxième modèle n'a pas vraiment bien fonctionné (valeur AUC : 0.69 pour l'arbre de décision et 0.53 pour la carte de Kohonen), et cela est dû probablement au manque de données d'apprentissage et à la qualité et pertinence de la connaissance humaine par rapport à ce critère.

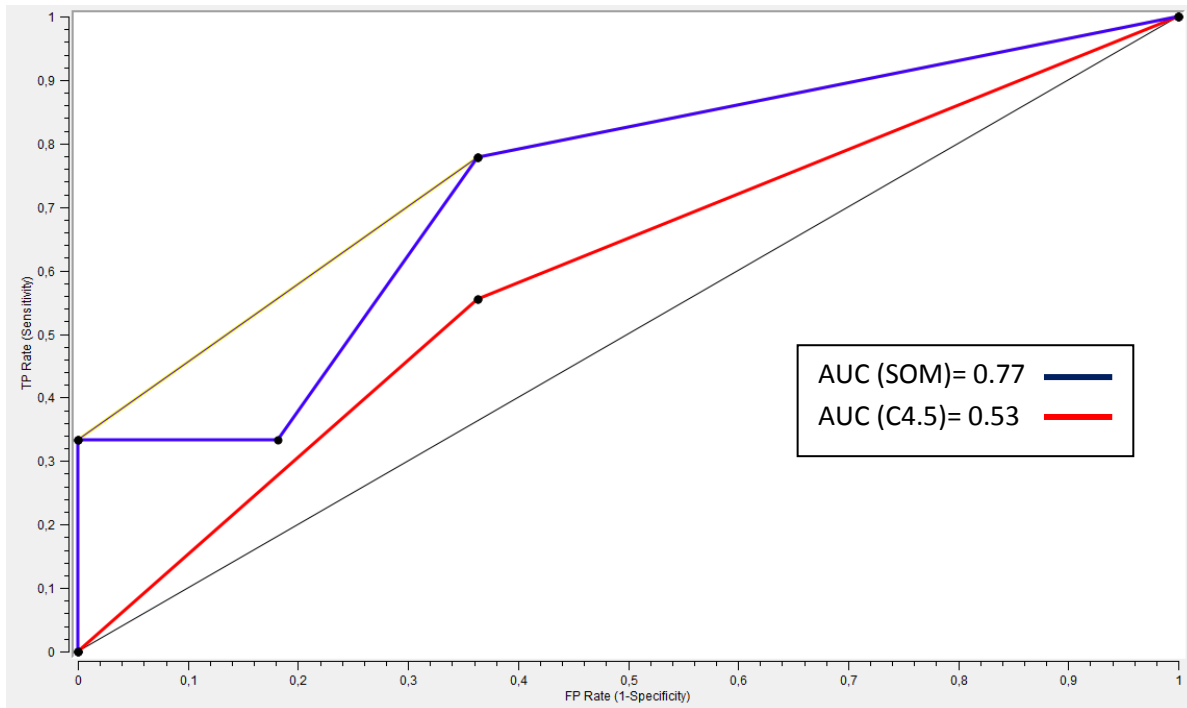


Figure 4. 26. Courbe ROC pour les deux modèles arbre de décision (C4.5) et carte de Kohonen (SOM) pour le développement produit par rapport à la sortie Y_1 (Contrainte traction / performance type renfort)

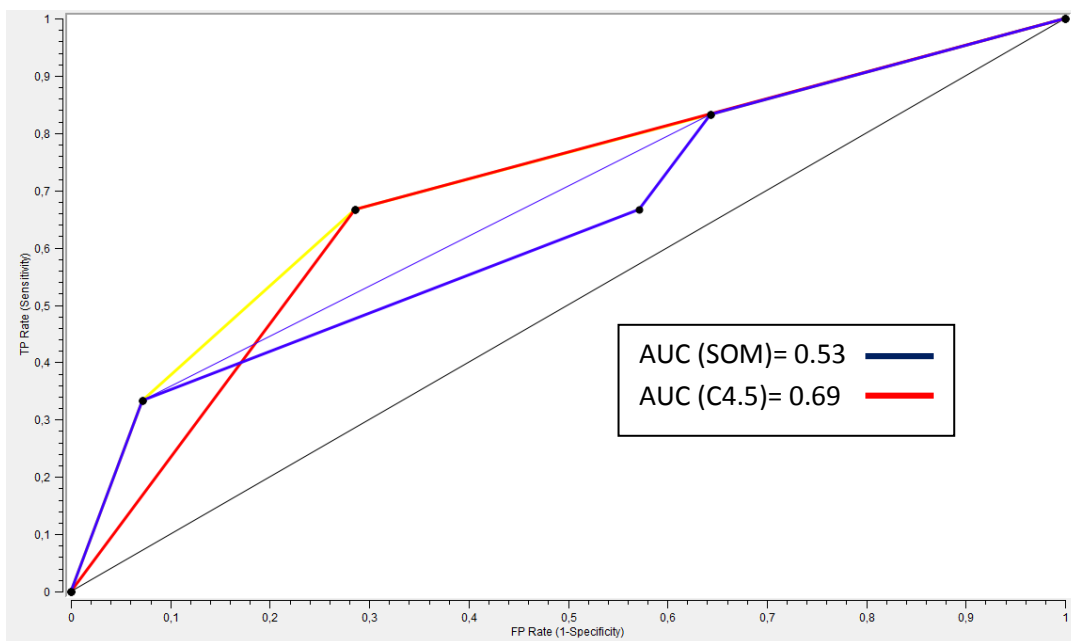


Figure 4. 27. Courbe ROC pour les deux modèles arbre de décision (C4.5) et carte de Kohonen (SOM) pour le développement produit par rapport à la sortie Y_4 (absorption acoustique / Influence type renfort)

Le tableau 4.6 récapitule l'ensemble des résultats présentés précédemment sur la performance des fibres de résine et de renfort sur les produits biocomposites.

Tableau 4. 6. Résultats de l'étude de performance des fibres de renfort et de résine

| | Renforts | | | | | Résines | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------|----------------------------------|-------------------------------|------------|
| | Lin en étoupe | Lin en filasse 80mm | Lin en filasse 120mm | Lin en filasse affiné | Fibre de Verre | Fibre PP | Fibre PLA | Fibre PA11 |
| Contrainte à la rupture en traction | ++ 12.7% Très Acceptable | ++++ 83.3% Très Acceptable | +++++ | +++++ | - 0 % | +++++ 100% Très Acceptable | +++ 50% Très Acceptable | +++++ |
| Absorption acoustique | + 33 % Acceptable | ++ 50 % Acceptable | - 0 % | - 0 % | - 0 % | + 21 % Acceptable | ++ 25 % Très Acceptable | - 0 % |

D'après le tableau 4.6, dans un premier temps, nous constatons que la filasse de lin 120 mm, la filasse affinée et la filasse de lin 80 mm sont les plus performantes par rapport aux contraintes mécaniques que le lin en étoupe ou la fibre de verre. La filasse de lin 80 mm et le lin en étoupe sont considérés comme les meilleures fibres de renfort par rapport aux performances acoustique. En effet dans un composite en filasse, les forces sont réparties tout au long de la fibre. Alors que dans un composite en étoupe, on remarque une discontinuité des forces appliquées sur l'échantillon. D'autre part, par rapport à la fibre de verre conçue dans la fabrication du composite, nous avons également constaté que la filasse de lin était plus performante en terme de performance mécanique et acoustique. Nous remarquons aussi d'après le tableau 4.6, que les fibres PP et PA11 présentent les meilleures performances mécaniques, et les moins performante en terme acoustique par rapport à la fibre PLA. Nous concluons ainsi, que les fibres de résine de type PLA donne le meilleure compromis en terme de performances acoustique et mécaniques 50% de classe sont très acceptable pour la traction et 25 % de classe sont très acceptable pour l'acoustique. Et le lin filasse 80 est considéré comme la meilleure fibre de renfort pour l'ensemble des propriétés fonctionnelles (83% de classe sont très acceptables pour la traction et 50 % de classe sont très acceptable pour l'acoustique). Et les fibres de verre sont les moins performantes en termes de conditions mécaniques et acoustique.

4.5. Détermination des espaces de fonctionnement les plus pertinents

Dans cette partie nous allons chercher les différentes zones de fonctionnement les plus pertinents pour optimiser le développement des produits biocomposites. Pour cela nous allons utiliser le deuxième outil, où nous allons présenter pour chaque facteur de conception numérique et pour chaque critère de qualité, les intervalles physiques de fonctionnement, pour une meilleure optimisation de ces intervalles. Pour les variables nominales nous avons présenté le pourcentage de distribution ou de modalité de chaque variable. Les figures 4.28 et 4.29 et 4.30 montrent les différents intervalles physiques des variables du modèle, ainsi que

les pourcentages des modalités des variables nominales pour les facteurs de conception et les critères de qualité.

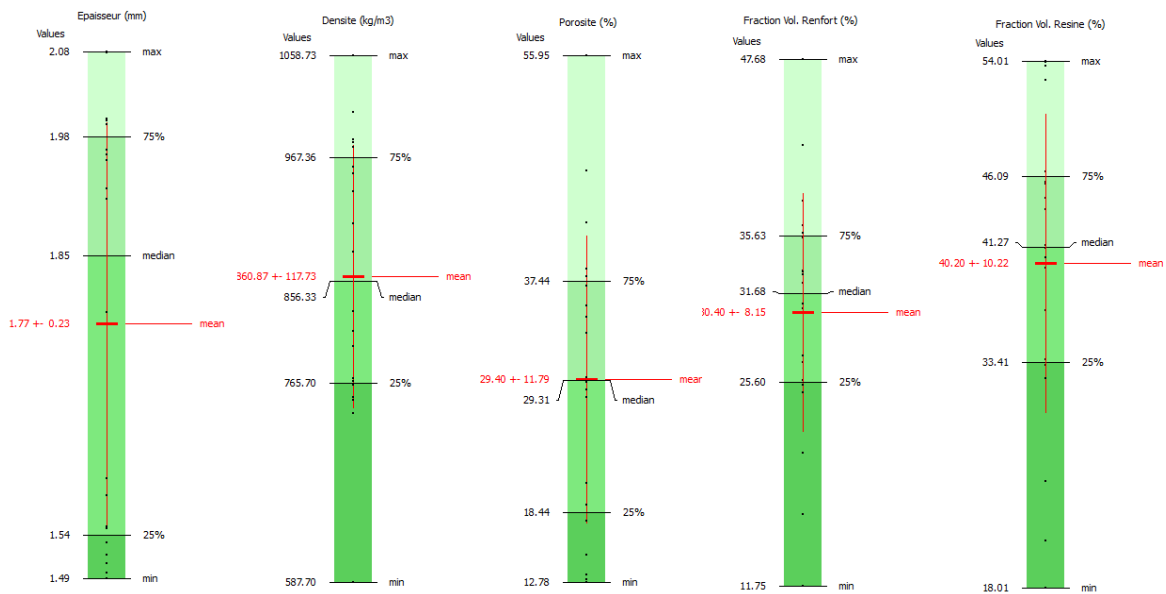


Figure 4. 28. Intervalles physique des facteurs de conception

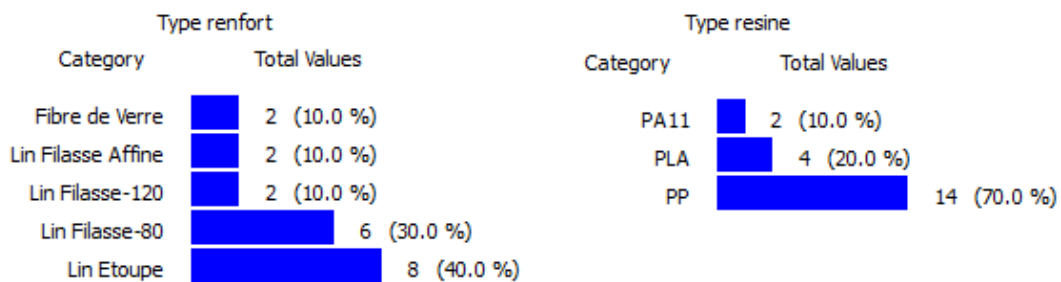


Figure 4. 29. Pourcentage des modalités des variables nominales des facteurs de conception

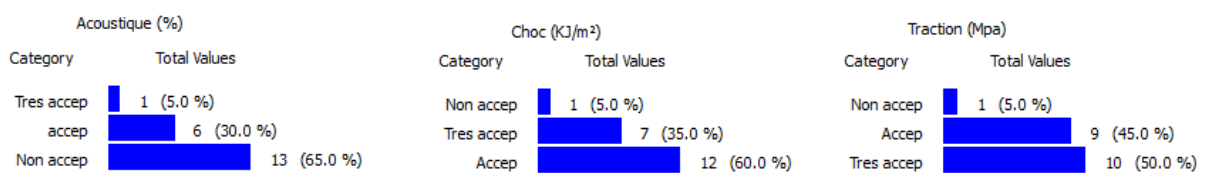


Figure 4. 30. Pourcentage des modalités des variables nominales des critères de qualité

Ces intervalles vont nous permettre de définir par la suite les zones de fonctionnement pour chaque facteur de conception par rapport à un critère de qualité.

Afin de définir les intervalles de fonctionnement les plus pertinents, qui répondent aux exigences des concepteurs, ces derniers ont définis un seuil d'acceptabilité (0.6), ce seuil va nous permettre par la suite de juger un produit. Si un degré d'acceptabilité d'un produit est supérieure a ce seuil, alors il est accepté sinon il est rejeté. Les figures 4.31 et 4.32 présentent

respectivement les résultats des différents intervalles pertinents des facteurs de conception de l'étude (zones en vert) par rapport aux deux critères de qualité traction et absorption acoustique. Ces intervalles nous permettent de mieux comprendre le comportement des biocomposites.

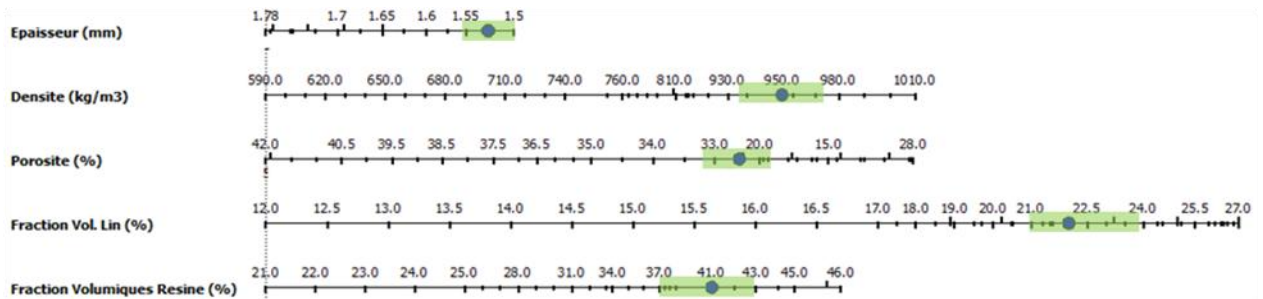


Figure 4. 31. Intervalle de fonctionnement des facteurs de conception pour le critère de qualité « Contrainte traction »

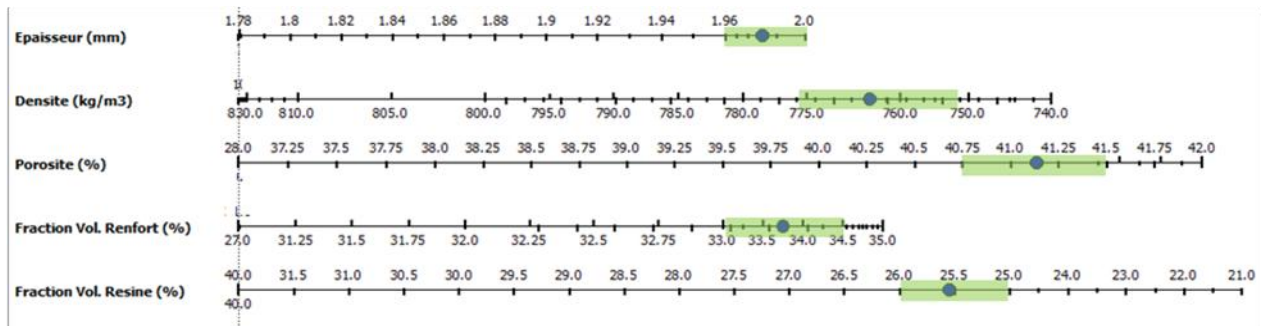


Figure 4. 32. Intervalle de fonctionnement des facteurs de conception pour le critère de qualité « Absorption acoustique »

D'après les figures 4.31 et 4.32, nous constatons que pour avoir de bonne performance en terme de traction, il faut généralement des produits avec une faible épaisseur [1.5, 1.55], densité élevé [940, 980], faible porosité [18, 30], grande fraction volumique renfort [21, 24] et une grande fraction volumique résine [37, 43]. Concernant les intervalles de fonctionnement les plus pertinents pour le critère de qualité absorption acoustique sont donnés comme suit : épaisseur élevé [1.96, 2], densité faible [750, 775], forte porosité [40, 41], grande fraction volumique renfort [33, 34] et une faible fraction volumique résine [25,26].

Par contre les intervalles de zone de fonctionnement ne permettent pas de traiter les variables nominales, type de résine et type de renfort, qui sont considérés comme nous l'avons vu précédemment, deux facteurs très pertinents. Pour cela nous allons utiliser les cartes de Kohonen (Figures 4.20 et 4.21) pour traiter ce type de variables. Ces cartes permettent aussi, d'avoir plus de précision sur les résultats des intervalles de fonctionnement les plus pertinents pour les variables numériques, et être plus conforme à la réalité et à la connaissance des experts, car elles seront générés a partir des données expérimentales et de la connaissance humaine.

Nous allons utiliser la deuxième forme de présentation des cartes de Kohonen, pour une meilleure visualisation des zones de fonctionnement, et faciliter ainsi, la tâche aux concepteurs pour détecter ces intervalles.

Pour générer les cartes, nous avons d'abord trié les cellules, par rapport aux facteurs de conception. Les figures 4.33, 4.34, 4.35 et 4.36 présentent respectivement les cartes de Kohonen en triant les cellules du facteur de conception « *porosité* » par rapport au type de résine et type de renfort pour les critères de qualité « *Contrainte traction* » et « *Absorption acoustique* ».

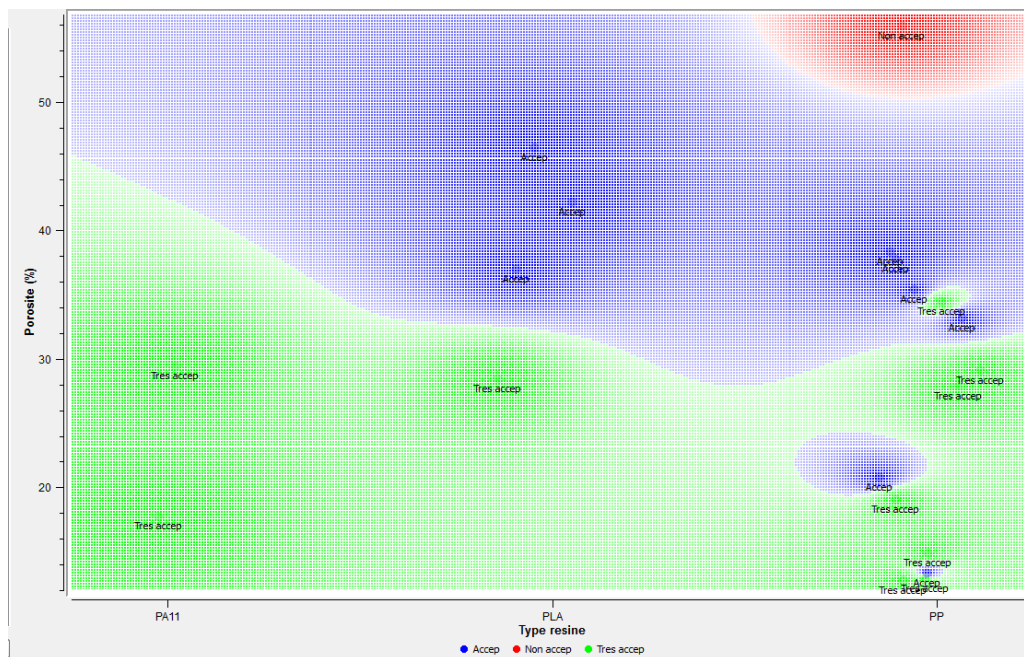


Figure 4. 33. Carte de Kohonen obtenu après le tri des cellules par rapport aux facteurs de conception « *Porosité* » en fonction de « *Type de résine* » pour le critère qualité « *Contrainte traction* »

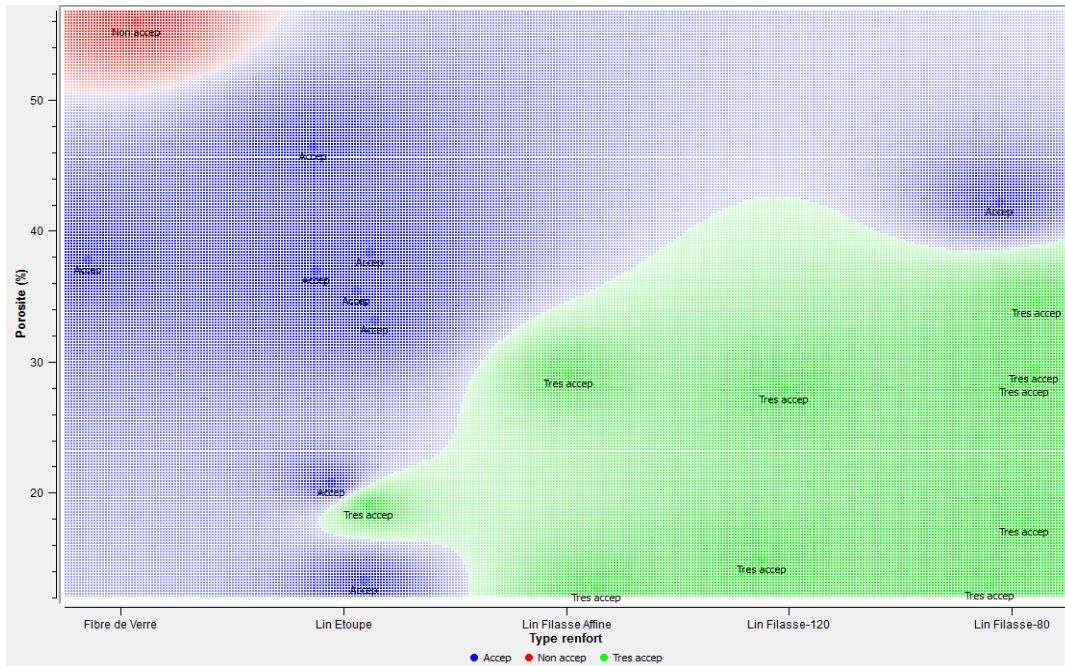


Figure 4. 34. Carte de Kohonen obtenu après le tri des cellules par rapport aux facteurs de conception « Porosité » en fonction de « Type de renfort » pour le critère qualité « Contrainte traction »

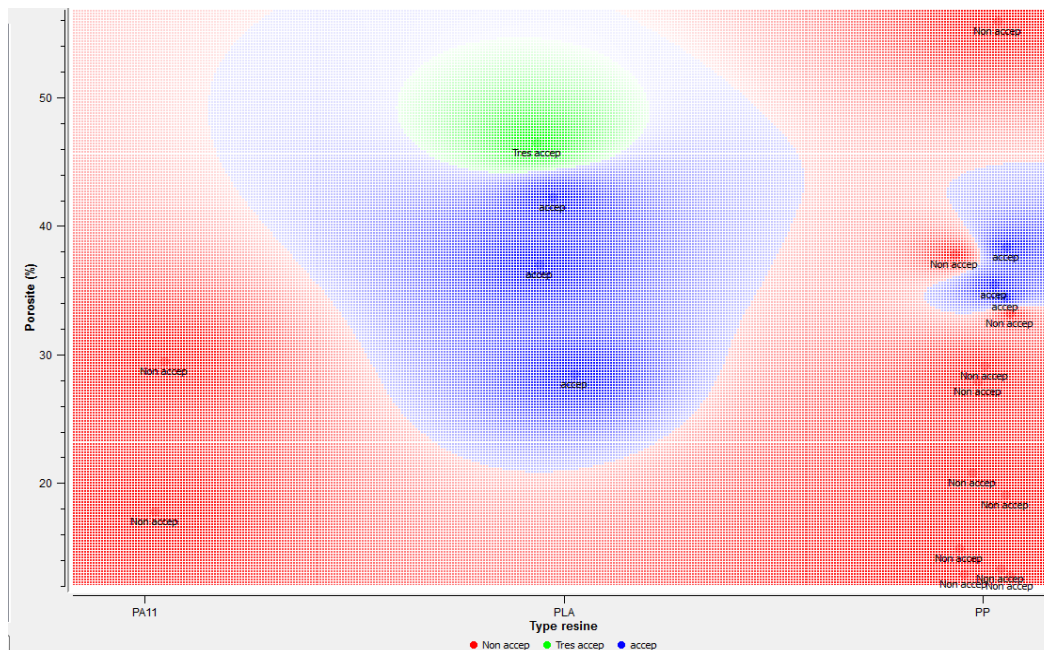


Figure 4. 35. Carte de Kohonen obtenu après le tri des cellules par rapport aux facteurs de conception « Porosité » en fonction de « Type de résine » pour le critère qualité « Absorption acoustique »

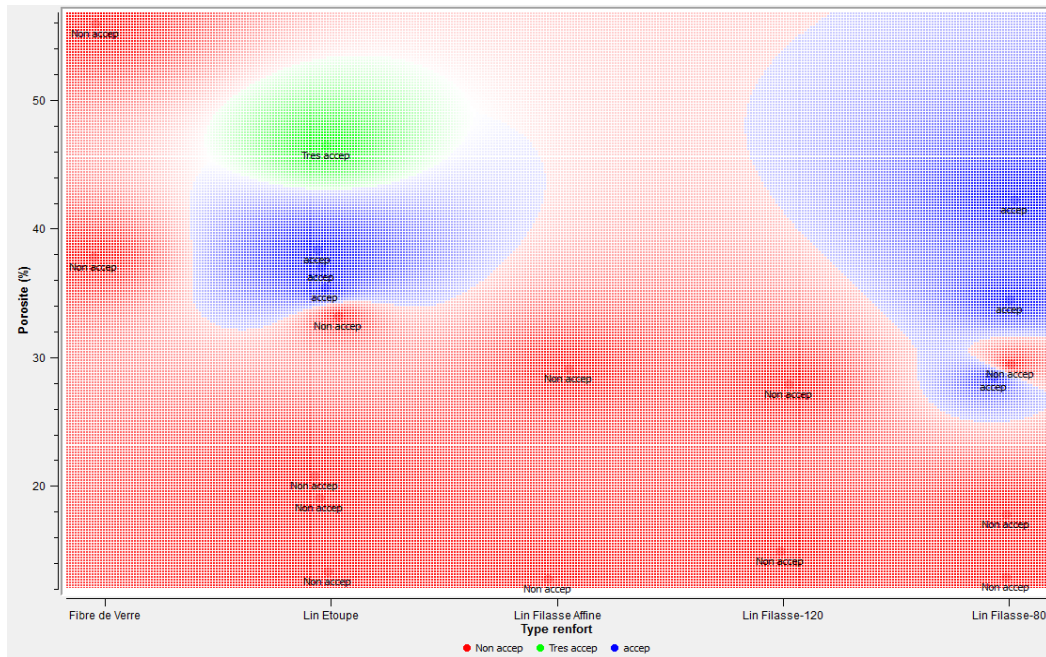


Figure 4. 36. Carte de Kohonen obtenue après le tri des cellules par rapport aux facteurs de conception « Porosité » en fonction de « Type de renfort » pour le critère qualité « Absorption acoustique »

D'après les figures 4.33, 4.34, 4.35 et 4.36, les intervalles de fonctionnements pertinents pour le critère de qualité « Contrainte traction » sont donnés dans les deux tableaux 4.7 et 4.8.

Tableau 4. 7. Intervalles de fonctionnement pertinents pour le critère de qualité « Contrainte traction » par rapport au type de résine

| Type de résine | Epaisseur (mm) | Densité (Kg /m ³) | Porosité (%) | Fraction vol renfort (%) | Fraction vol résine (%) |
|----------------|----------------|-------------------------------|----------------|--------------------------|-------------------------|
| PA11 | [1.62, 2.07] | [907.95, 1058.73] | [17.8, 29.5] | [11.75, 47.68] | [39.82, 54.01] |
| PLA | [1.49, 1.66] | [953.18, 1058.73] | [17.8, 28.49] | [22.32, 30.03] | [45.75, 54.01] |
| PP | [1.51, 1.54] | [798.68, 1008.05] | [12.78, 29.13] | [24.94, 33.21] | [43.88, 54.01] |

Tableau 4. 8. Intervalles de fonctionnement pertinents pour le critère de qualité « Contrainte traction » par rapport au type de renfort

| Type de résine | Epaisseur (mm) | Densité (Kg /m ³) | Porosité (%) | Fraction vol renfort (%) | Fraction vol résine (%) |
|--------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Fibre de verre | Aucun intervalle pertinent | Aucun intervalle pertinent | Aucun intervalle pertinent | Aucun intervalle pertinent | Aucun intervalle pertinent |
| Lin étoupe | [1.54, 1.55] | [1008.05, 1058.73] | [18.7, 19.09] | [44.98, 47.68] | [45.75, 54.01] |
| Lin filasse affiné | [1.5, 1.95] | [798.68, 982.97] | [12.78, 29.13] | [26.98, 33.22] | [43.88, 54.01] |
| Lin filasse 120 | [1.54, 1.96] | [812.14, 958.39] | [14.96, 29.97] | [11.75, 47.68] | [44.62, 52.66] |
| Lin filasse 80 | [1.51, 2.07] | [738.26, 1058.73] | [12.95, 34.5] | [24.98, 47.68] | [39.82, 53.9] |

Les tableaux 4.9 et 4.10 présentent respectivement les intervalles de fonctionnements pertinents pour le critère de qualité « Absorption acoustique » par rapport au type de résine et type de renfort:

Tableau 4. 9. Intervalles de fonctionnement pertinents pour le critère de qualité « Absorption acoustique » par rapport au type de résine

| Type de résine | Epaisseur (mm) | Densité (Kg /m ³) | Porosité (%) | Fraction vol renfort (%) | Fraction vol résine (%) |
|----------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| PA11 | Aucun intervalle pertinent | Aucun intervalle pertinent | Aucun intervalle pertinent | Aucun intervalle pertinent | Aucun intervalle pertinent |
| PLA | [1.78, 2.08] | [750.31, 953.18] | [43.79, 53.17] | [20.81, 41.32] | [18.01, 45.74] |
| PP | [1.91, 1.99] | [738.26, 767.37] | [34.5, 38.41] | Aucun intervalle pertinent | [18.01, 25.33] |

Tableau 4. 10. Intervalles de fonctionnement pertinents pour le critère de qualité « Absorption acoustique » par rapport au type de renfort

| Type de résine | Epaisseur (mm) | Densité (Kg /m ³) | Porosité (%) | Fraction vol renfort (%) | Fraction vol résine (%) |
|--------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Fibre de verre | Aucun intervalle pertinent | Aucun intervalle pertinent | Aucun intervalle pertinent | Aucun intervalle pertinent | [18.05, 24.09] |
| Lin étoupe | [1.78, 2.02] | [750.53, 883.56] | [35.44, 46.51] | [35.49, 36.29] | [18.01, 26.04] |
| Lin filasse affiné | Aucun intervalle pertinent | Aucun intervalle pertinent | Aucun intervalle pertinent | Aucun intervalle pertinent | [18.05, 24.09] |
| Lin filasse 120 | Aucun intervalle pertinent | Aucun intervalle pertinent | Aucun intervalle pertinent | Aucun intervalle pertinent | Aucun intervalle pertinent |
| Lin filasse 80 | [1.78, 1.99] | [600.53, 769.81] | [34.5, 55.66] | [11.75, 25.76] | [40.56, 45.75] |

Les résultats des tableaux présentés précédemment, vont nous permettre principalement d'améliorer les performances mécaniques ou acoustiques des produits biocomposites.

4.6. Evaluation multicritère des produits

Dans les outils que nous avons utilisé jusqu'à maintenant, la notion de multicritère n'a pas été prise en considération, c'est-à-dire nous avons étudié chaque critère de qualité de manière isolée. Pour cela et afin de mieux évaluer la performance des produits développés, et également connaître l'impact de chaque critère de qualité sur la performance globale du produit afin de procéder à des améliorations techniques sur le produit. Cette évaluation implique couramment plusieurs critères quantitatifs et qualitatifs. C'est-à-dire qu'ils comprennent des mesures physiques et des appréciations humaines, ces dernières étant tirées d'un panel d'évaluateurs (experts spécialisés en produits).

Pour cela nous allons appliquer le troisième outil pour évaluer les produits développés, en prenant en considération le principe de la multifonctionnalité des produits, en l'occurrence ici, les performances mécaniques et les performances acoustiques. Nous avons d'abord proposé une structure hiérarchisée pour l'évaluation globale des prototypes des matériaux biocomposites. La figure 4.37 montre la structure hiérarchique proposée par les experts du domaine. Nous rappelons que la structure est définie sur trois niveaux. Le premier niveau comprend les principaux indicateurs d'évaluation, pour cet exemple nous avons identifié 13 indicateurs : possibilité de thermoformage, performance acoustique (« *Absorption acoustique*»), performances mécaniques (« *contrainte traction* », « *Résistance choc* » et « *Module flexion* »), densité du composite, sensibilité à la lumière du renfort, sensibilité à l'humidité du renfort, coût de la matière première, combustion sans dégagement de gaz

toxique, aptitude à être recyclé, impact environnementale de la résine et impact environnementale de la fibre de renfort. Le deuxième niveau présente les critères de l'évaluation, qui regroupe les différents indicateurs en huit catégories proposées par les experts : facilité d'utilisation, propriétés fonctionnelles, paramètres structurels, durabilité, coût de production, possibilité de combustion, aptitude au recyclage et impact environnemental de la matière première. Le troisième niveau est l'aspect de l'évaluation qui regroupe trois critères : qualité, coût et impact environnemental. Ces niveaux permettent de définir l'évaluation globale du produit après l'agrégation des résultats d'évaluation de chaque niveau. Ensuite, nous introduisons les poids de pondération pour chaque élément dans les trois niveaux : $W_{Ci}, W_{Ci} \in \{Non\ Important\ (NI),\ Important\ (I),\ Absolument\ Important\ (AI)\}$, notés et désignées respectivement $a_1 = 0.2, a_2 = 0.6, a_3 = 0.9$

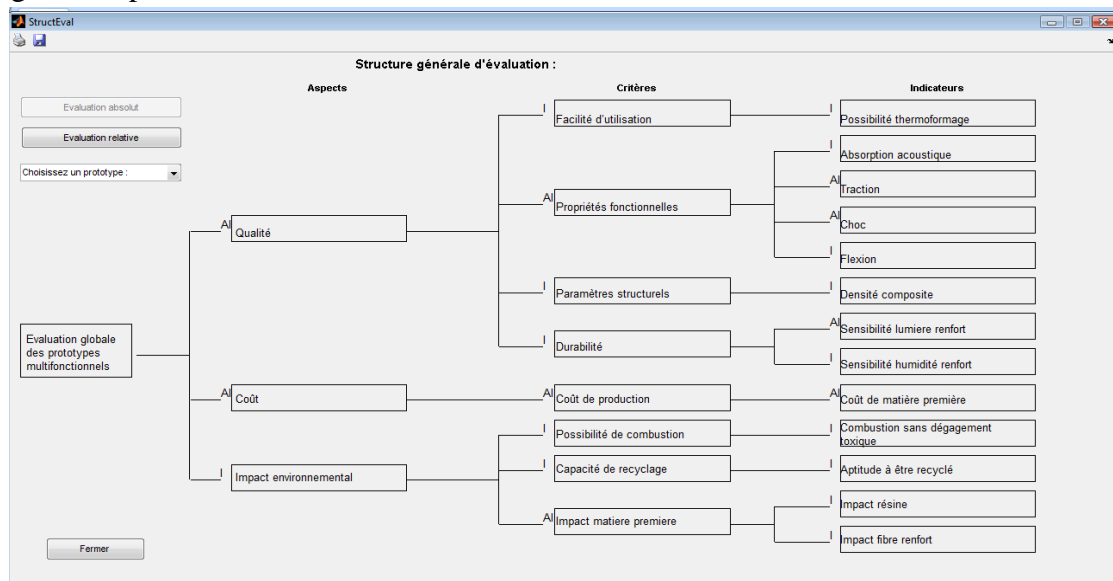


Figure 4. 37. Structure hiérarchique générale proposée pour l'évaluation globale des prototypes

Dans la Figure 4.37, les indicateurs sensibilité lumière renfort, sensibilité humidité renfort, combustion sans dégagement toxique, aptitude à être recyclé, impact résine et impact fibre renfort sont des critères directs, qui sont évalués subjectivement par les experts en utilisant des valeurs de $b_1 = 0.2, b_2 = 0.6, b_3 = 1$. Les indicateurs des propriétés fonctionnelles, des propriétés structurelles et des contraintes économiques, physiquement mesurés sur les appareils ou calculés selon les lois connus, sont des critères indirects. Les mesures numériques de ces indicateurs indirects sont transformées en degrés de préférence selon le Tableau 4.11 puis en valeurs floues les plus proches parmi $b_1 = 0.2, b_2 = 0.6, b_3 = 1$.

Tableau 4. 11. Degré de préférence des critères indirects

| Catégorie | Indicateur | Fonction de degré de préférence |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Propriétés fonctionnelles | Absorption acoustique | $trapmf [0 \ 15 \ 25 \ 100]$ |
| | Contrainte traction | $trapmf [0 \ 10 \ 20 \ 40]$ |
| | Résistance choc | $trapmf [0 \ 1500 \ 3000 \ 5000]$ |
| | Module flexion | $trapmf [0 \ 20 \ 35 \ 80]$ |
| Propriétés structurelles | Densité composite | $trapmf [0 \ 500 \ 850 \ 1500]$ |
| Contraintes économiques | Coût matière première | $trapmf [0 \ 0 \ 3 \ 8]$ |

Dans notre étude, les dix prototypes de matériaux composites sont évalués par les experts. Un seuil s de 60% a été défini dans le cahier des charges comme niveau d'acceptation pour l'évaluation par le concepteur, cela signifie que les prototypes qui auront une valeur d'acceptabilité supérieure à ce seuil seront acceptés, sinon ils seront rejetés. La figure 4.38 regroupe les résultats des degrés d'acceptabilité par rapport à l'ensemble des critères d'évaluation illustré dans la Figure 4.37.

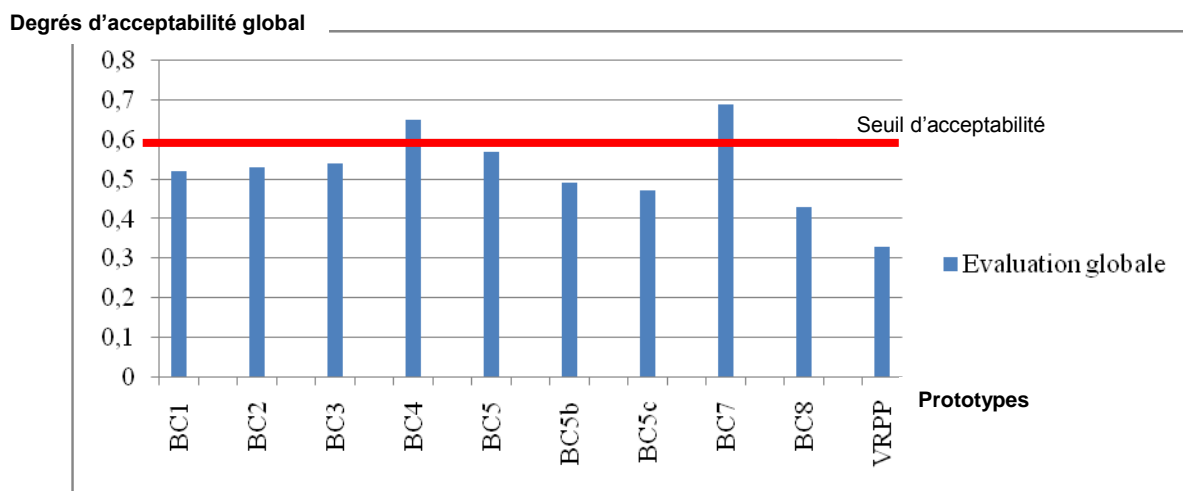


Figure 4. 38.Degrés d'acceptabilité global des prototypes liés aux critères de l'évaluation

D'après la figure 4.38, nous constatons que les prototypes BC7 (mélange de 40% de lin filasse 80mm et de 60% de PLA) et BC4 (mélange de 70% de lin en étoupe et de 30% de PLA) sont les plus satisfaisant, et le produit VRPP (mélange de 50% de fibre de verre et de 50% de PP) est le moins satisfaisant. Le degré d'acceptabilité global absolu du prototype BC7 par rapport à l'ensemble des critères d'évaluation est illustré dans la Figure 4.39.

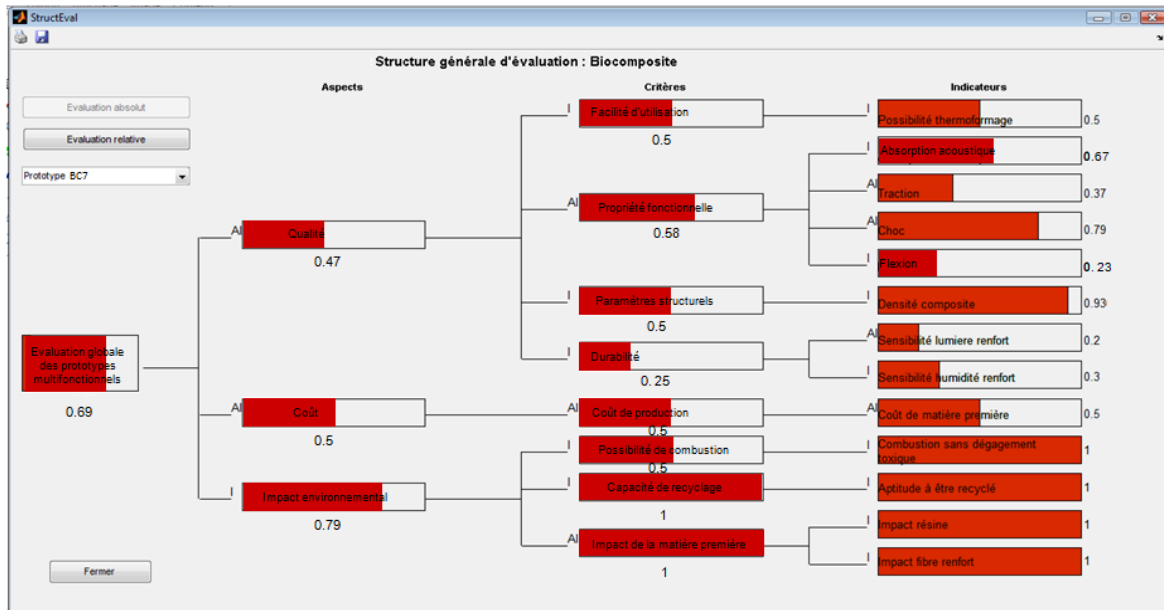


Figure 4. 39. Degrés d'acceptabilité global absolu pour le prototype BC7

Après avoir normalisé les degrés de préférence des prototypes correspondant à chaque critère de qualité sur l'intervalle $[0, 1]$, nous pouvons obtenir, pour ce critère, un degré d'acceptabilité relatif. Cela nous permet de comparer l'ensemble des prototypes par rapport à chaque critère de qualité. La Figure 4.40 présente le degré d'acceptabilité relatif pour le prototype *BC7*. Nous pouvons constater que le prototype *BC7*, possède le plus grand degré d'acceptabilité relatif, et ceci est principalement lié au fait que ce dernier est le plus favorable pour l'aspect « *Qualité* » (0.71).

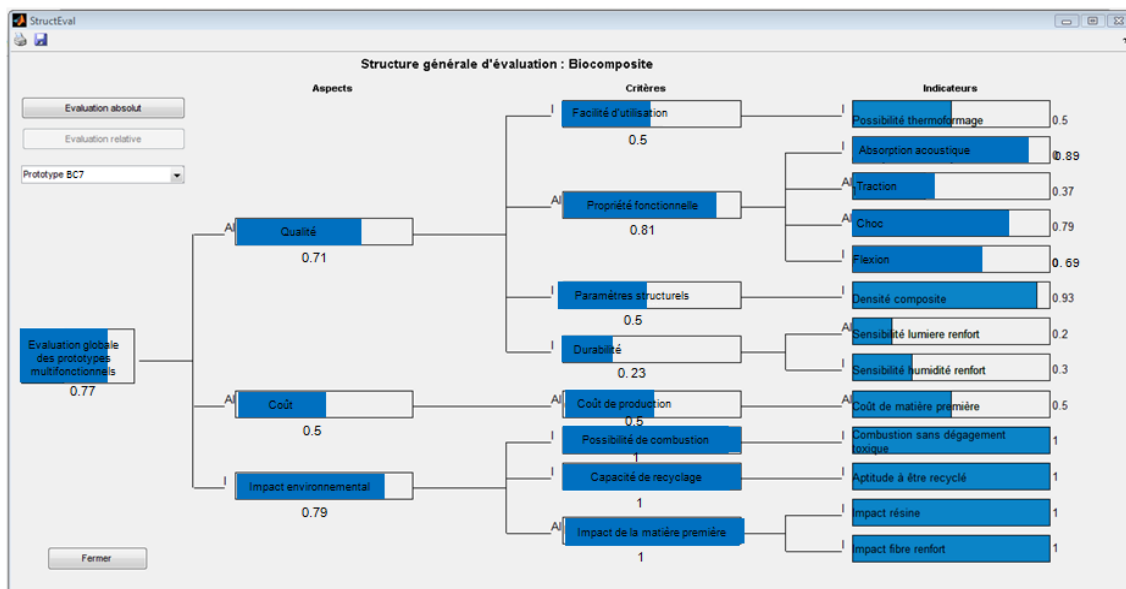


Figure 4. 40. Degrés d'acceptabilité global relatif pour le prototype BC7

En nous appuyant sur tous ces résultats, nous pouvons conclure que la méthode proposée est flexible et interprétable. D'une part, elle est capable d'agrèger les degrés

d'acceptabilités globaux en considérant les critères de qualité multiples et en utilisant une structure hiérarchisée. D'autre part, le degré d'acceptabilité à un aspect ou à une catégorie spécifique, qui peut être utilisé pour étudier l'influence d'un critère particulier sur la performance du produit.

4.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu appliquer les outils d'aide à la décision développés dans le cadre de l'étude du comportement de matériaux composites, dans le but d'orienter leurs caractéristiques en fonction des applications ou propriétés visées.

L'étude nous a montré la complexité de développement de nouveaux produits composite, le système d'aide à la conception développé nous a permis de réduire cette complexité, grâce aux nouvelles méthodes et aux techniques développées, notamment pour traiter les variables qualitatives ou intégrer la connaissance humaine qui s'avère très pertinentes dans ce type d'étude. D'après l'analyse que nous avons effectuée, nous avons pu constater que dans un composite, le choix des matériaux et la méthode de fabrication jouaient un rôle très important sur les performances mécaniques et acoustiques.

Plusieurs produits biocomposites à base de fibres de lin sous différentes qualités (étoupe, filasse et filasse affinée) et de résines thermoplastiques (PP, PLA et PA11) ont été développés. Les enjeux de cette étude, était d'étudier l'influence des différentes qualités de lin en tant que renfort sur les performances mécaniques et acoustiques des composites. Nous avons également étudié l'importance d'utiliser des matrices de différentes natures. En étudiant principalement les corrélations et les correspondances entre les variables définies par l'expert, que se soit pour les facteurs de conception (« *Type résine* », « *Type fibre* », « *Epaisseur* »,...) ou pour les critères qualité (« *Absorption acoustique* », « *Résistance choc* », ...). L'étude nous a permis également d'analyser la sensibilité, la pertinence et la performance des facteurs de conception, de définir les zones de fonctionnement les plus pertinentes, et l'évaluation multicritère des produits.

Ce type d'étude doit permettre de répondre aux problématiques industrielles futures en apportant des avancées technologiques, sources d'intégration de fonction et donc de gain de compétitivité dans ces domaines. L'intégration de nouvelle méthode pour traiter les variables nominales dans les matériaux composites thermoplastiques et la recherche de matériaux thermoplastiques innovants sont des enjeux majeurs et permettront d'anticiper les ruptures technologiques dans le domaine de matériaux et procédés.

Conclusion générale et perspectives

L'étude menée durant cette thèse doctorale s'est principalement focalisée sur le développement d'un système d'aide à la conception des matériaux composites et textiles. En fait, la plupart des outils d'aide à la conception disponibles aujourd'hui sont basées sur l'utilisation des techniques de calcul classiques, telles que les statistiques. Dans la pratique, ces techniques sont assez limitées pour résoudre des problèmes rencontrés lors de la conception d'un produit industriel, en raison de la complexité du comportement du produit, de l'incertitude du processus de conception et du faible nombre de données expérimentales. Ainsi, il est nécessaire d'introduire de nouvelles techniques de calcul mieux adaptées à la conception de matériaux et de procédés afin d'assurer une optimisation maximum dans le processus de conception.

Après un état de l'art sur les concepts de base et les méthodes de calcul sur l'aide à la décision, nous nous orientons vers la structure générale et les problèmes rencontrés du système d'aide à la conception de procédés et de produits industriels. Il s'agit d'un domaine très complexe en raison de nombreuses contraintes, en particulier de la diversité des facteurs de conception et des critères de qualité, liées aux matières premières et aux paramètres de procédé et de structure. Les problèmes rencontrés comprennent notamment : 1) la réduction de la complexité des facteurs de conception (variables d'entrée), 2) la modélisation des relations entre les facteurs de conception et les critères de qualité, 3) le classement des produits avec des critères multiples. Selon nos expériences, les outils de calcul, développés à partir des techniques intelligentes, sont efficaces pour résoudre ces problèmes. Ces outils, constituant un système d'aide à la conception, permettent aux industriels de sélectionner des facteurs de conception pertinents, de déterminer les espaces de fonctionnement faisables et pertinents, et d'évaluer globalement la qualité des prototypes sur plusieurs niveaux d'appréciation.

Dans le cadre de ma thèse doctorale, je me suis essentiellement concentré sur la résolution de deux problèmes particuliers, soit le traitement de variables qualitatives et l'intégration de la connaissance humaine dans la démarche de modélisation. Les nouvelles solutions proposées permettent d'améliorer les outils d'aide à la conception par intégration de données expérimentales et de la connaissance humaine. Pour cela, nous avons utilisé les techniques de calcul avancé, comprenant la logique floue, les arbres de décision et les cartes de Kohonen. Ces méthodes constituent ainsi, une alternative intéressante aux modèles classiques pour améliorer le développement d'outils d'aide à la conception de nouveaux procédés et produits. De plus, nous avons réalisé le système d'aide à la conception de nouveaux matériaux, intégrant l'ensemble des méthodes développées, en s'appuyant sur des supports informatiques avancés, comme le langage UML et la programmation orientée objet. Dans ce système, les différents modules fonctionnels sont organisés de façon simple avec des interfaces conviviales pour les utilisateurs.

La performance du système d'aide à la conception a été validée à travers deux applications. La première consiste au développement d'un procédé industriel, en étudiant le transfert de fibres dans un procédé d'assemblage de structures nontissées par aiguilletage. L'étude a permis de générer des informations très utiles pour la conception de nouveau procédé d'aiguilletage, notamment pour identifier les meilleures associations fibres/aiguilles et quantifier le transfert de fibre. La deuxième application consiste au développement de produit industriel, en étudiant les relations entre les propriétés produit et les paramètres structures de matériaux biocomposites thermoplastiques. Cette étude a permis d'étudier l'influence des différentes qualités de lin sur les performances mécaniques et acoustiques des composites et l'importance d'utiliser des matrices de différentes natures.

Les deux applications ont confirmé la complexité de développement de nouveaux procédés et de nouveaux produits industriels. Le système d'aide à la conception développé nous a permis de réduire cette complexité. Il a été appliqué avec succès grâce aux nouvelles méthodes et techniques développées, notamment pour traiter les variables qualitatives, qui s'avèrent très importantes de les traiter comme étant des variables spécifiques, sans les transformer en variables numériques. Le système d'aide à la conception développé nous a également permis l'intégration de la connaissance humaine qui est très pertinente dans la validation des résultats de l'étude.

Les retombées scientifiques et techniques de cette thèse doctorale, se situent principalement dans le développement d'un système d'aide à la conception de procédés et matériaux complexes et multifonctionnels. Ce système est flexible. Il pourra s'appliquer à de nombreux domaines d'applications (composites, filtration, biomatériaux, etc.). D'ailleurs, l'application du système proposé à d'autres domaines industriels, pourrait être une piste intéressante pour valider la performance des outils. De plus, le système d'aide à la conception proposé comprend également une série de modèles caractérisant les relations propriété/structure/procédé, créés à partir d'une base d'apprentissage de données expérimentales quantitatives et qualitatives, et de connaissances des experts. Les outils développés conduisent à la compréhension des structures des matériaux et des procédés de fabrication, à la prédiction des performances des procédés et produits finaux, ainsi qu'à l'optimisation des structures de matériaux et des procédés par rapport à une demande personnalisée de l'utilisateur. D'un point de vue expérimental, il serait intéressant aussi d'approfondir les études d'application, en rajoutant d'autres facteurs de conception ainsi que d'autres critères de qualités.

Enfin, les résultats obtenus issus de cette thèse pourront contribuer à une meilleure compréhension du comportement des procédés et des matériaux, et à répondre aux problématiques industrielles du futur en apportant des avancées technologiques sources d'intégration de fonction et donc de gain de compétitivité dans les domaines du textile et des matériaux composites.

Glossaire

Matériau

Élément constitutif d'un produit fini. Il désigne soit la nature elle-même du matériau (ou matière), soit la structure morphologique du matériau [Mercier, 2002].

Matériau fibreux

C'est une classe du matériau dont la structure (plus ou moins complexe) est composée de structures élémentaires enchevêtrées et appelées fibres (matière première). Nous parlons aussi de matériau textile et par simplification de textile pour désigner le matériau fibreux, quelque soit le produit ou l'application finale (du vêtement au produit technique...). La fabrication d'un matériau fibreux, basée sur la fibre en tant que matière première élémentaire, peut faire appel à un nombre important de technologies parmi lesquels figurent les procédés de fabrication des non-tissés [CTT, 1994].

Matériau multifonctionnel

Ce dit d'un matériau qui cumule plusieurs fonctionnalités. Ce matériau répond non seulement à des fonctionnalités de base mais aussi à d'autres propriétés spécifiques à l'application [Vroman, 2008a].

Propriété fonctionnelle

Propriété ou grandeur physico-chimique du matériau relative aux fonctionnalités du matériau (ex. : résistance à l'éclatement, absorption acoustique, etc.) [Vroman, 2008a].

Propriété structurelle

Grandeur physico-chimique du matériau relative à la morphologie et aux propriétés de la structure du matériau (ex : épaisseur, porosité, densité volumique de fibre, énergie de surface, etc.) [Vroman, 2008a].

Bibliographie

[Fowlkes, 1998] Fowlkes W. et Creveling C. L'ingénierie robuste. 1e éd Paris: Dunod, 1998, 424 p.

[Gautier, 1995] Gautier R. Qualité en conception de produits nouveaux: proposition d'une méthode de fiabilisation du processus de management de l'information. 221 p. Thèse: Génie industriel: Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris: 1995.

[Roy, 1985] Roy B. Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision. Economica, Paris, 1985

[Leclercq, 2007] Jean-Paul Leclercq, systèmes d'aide à la décision, Facultés Universitaires Notre Dame de la Paix, 2007.

[Guitouni 1998a] Guitouni A. L'Ingénierie du Choix d'une Procédure d'Agrégation Multicritère. Thèse de Doctorat, Université Laval, 1998

[Guitouni, 1999] Guitouni A, Martel J-M, Vincke Ph. Un Cadre de Référence pour le Choix d'une Procédure d'Agrégation Multicritère. Document de travail, FSA-1999-013, Université Laval, Québec, Canada. 1999.

[Guitouni, 1998b] Guitouni, A., Martel, J.-M. "Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method." European Journal of Operational Research, 109(2), 501-521. 1998

[Saporta, 2006] Saporta, G. Probabilités, analyses des données et statistiques. TECHNIP. 2006

[Cibois, 2006] Philippe Cibois, Principe de l'analyse factorielle, université de Versailles – St-Quentin, 2006.

[Baccini, 2010] Alain Baccini, Statistique Descriptive Multidimensionnelle, Publications de l'institut de mathématiques de Toulouse, Mai 2010

[Hammami , 2003] Abdelkader Hammami, Modelisation technico-economique d'une chaine logistique dans une entreprise reseau, Thèse doctorat , La Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, Québec, Canada 2003

[Brans et Vincke, 1985] Brans J.P, Vincke Ph. A Preference Ranking Organization Method. Management Science, 31, 6. P 647-656. 1985.

[Vincke, 1989] Ph. Vincke, L'aide multicritère à la décision, édition Ellipses, 2e édition de l'université de Bruxelles, 1989

- [Roy 1968] Roy B. Classement et Choix en Présence de Points de Vue Multiples (la Méthode Electre). Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle. Vol 2, N° 8, p57-75. 1968.
- [Maystre, 1994] L. Y. Maystre, J. Pictet, J. Simos, Méthodes multicritères ELECTRE, édition Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1994
- [Voogd 1983] Voogd H. Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning. Pion Ltd, London, 1983.
- [Bouyssou, 1984] Bouyssou D. Approches descriptives et constructives d'aide à la décision : Fondements et comparaison, thèse de Doctorat, Méthodes scientifiques de gestion, Université de Paris Dauphine. 1984
- [Saaty 1980] Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process. New York, McGraw- Hill, 1980.
- [Vroman, 2007] The 4th International Conference on Advanced Fiber/Textile Materials, Intelligent design and production of advanced nonwoven products: from market needs to industrial processing par VROMAN P. Ueda, Japan: December 13-14, 2007.
- [Deng, 2008] Deng X. Développement d'un outil d'aide à la conception des matériaux fibreux multifonctionnels par les techniques de calcul avancé. Thèse de l'université de Lille Nord de France, GEMTEX, ENSAIT, 173 p, Roubaix 2008.
- [Demonsant, 2002] L'ingénierie robuste par Demonsant J., Paris: Lavoisier, 2002, p. 115-153. (La qualité: démarche, méthodes et outils)
- [Allen, 2006] Allen T. Engineering statistics and six sigma. 1e éd. London: Springer, 2006, 529 p.
- [Merlo, 2008] Merlo C. Les systèmes d'information, volume 1: management des hommes, des projets et des informations, par YANNOU B., BIGAND M., GIDEL T. MERLO C. et VAUDELIN J. P., Paris: Lavoisier, 2008, p. 199-272. (La conception industrielle de produits)
- [Yannou, 2002] Yannou B. L'aide à la décision avec la méthode TCMC. Technologie, 2002, vol.121, p. 32-37.
- [Limayem, 1999] Limayem F. et Yannou B. Towards a need satisfaction oriented computer aided design, par BATOZ J. L. et CHEDMAIL P., Berlin: Kluwer Academic Publishers, 1999, p. 489-496. (Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering)
- [Vroman, 2008a] Vroman P. Méthodologie de conception de textiles techniques et matériaux avancés, 2008, Note de cours.
- [Vroman, 2008b] Vroman P, Koehl L, Zeng X. et Chen T. Designing structural parameters of nonwoven using fuzzy logic and neural network. 2008.

- [Leary, 1998] Leary P. et Galliari P. Feature selection with neural network. Université Paris 6, Paris, France [en ligne], 1998.
- [Regner, 2008] Regner M. What is principal component analysis. *Nature Biotechnology*, 2008, vol.26, n°3, p. 303-304.
- [Yeniay, 2002] Yeniay O., Goktas A. A comparison of partial least square regression with other prediction methods. *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics*, 2002, vol.31, p. 99-111.
- [Blum, 1997] Blum A. L. et Langel Y P. Selection of relevant features and examples in machine learning. *Artificial Intelligence*, 1997, vol. 97, p. 245-271.
- [Deng, 2006] Deng X, Vroman P., Zeng X. et Koehl L. A fuzzy based criterion for selecting relevant process parameters for the development of nonwoven products. *Journal Information and Computing Science*, 2006, vol.2, n°2, p. 93-102.
- [Deng, 2007b] Deng X, Vroman P., Zeng X. et Koehl L. Futuro textiles International Conference, A design support system for the development of future nonwoven-based products integrating expert's knowledge. Roubaix, France: November 23-24, 2007
- [Laouisset, 2011a] Brahim Laouisset, Xianyi Zeng, Philippe Vroman, Xiaoguang Deng. Détermination des espaces de fonctionnement des matériaux multifonctionnels par les techniques intelligentes, Journées Identification Modélisation Expérimentale, Douai, France, 6-7 avril 2011
- [Deng, 2008b] IEEE World Congress on Computational Intelligence, A fuzzy multi-criteria group decision support system for nonwoven based cosmetic product development evaluation par LU J, Deng X, Vroman P, Zeng X, MA J. et Zhang G. HongKong: June 1-6, 2008.
- [Laouisset, 2010] Brahim Laouisset, Xianyi Zeng, Philippe Vroman, Xiaoguang Deng. Multicriteria Assessment of Product Prototypes using Hierarchical Fuzzy Model: Dynamic Interfaces and Treatment of Nominal Variables, Sousse, Tunisie CONFERE Juillet 2010
- [Lu, 2008] LU J., Deng X., Vroman P., ZENG X., MA J. et Zhang G. IEEE World Congress on Computational Intelligence, A fuzzy multi-criteria group decision support system for nonwoven based cosmetic product development evaluation. Hong Kong: June 1-6, 2008.
- [Huang, 1998] Zhexue Huang, Extensions to the k-Means Algorithm for Clustering Large Data Sets with Categorical Values, *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2, 283–304 (1998)
- [Huang, 1997] A fast clustering algorithm to cluster very large categorical data sets in data mining. *Proceedings of the SIGMOD Workshop on Research Issues on Data Mining and Knowledge Discovery*, Dept. of Computer Science, The University of British Columbia, Canada, pp. 1–8.

[Linard, 1990] M. Linard Des machines et des hommes, apprendre avec les nouvelles technologies, Editions Universitaires, 1990.

[Darmendrail, 2003] Aide à la décision, Réseau CLARINET Principaux résultats des groupes de travail, Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2003 PSP03EPI50, Septembre 2003.

[Marek, 2002] Marek J, Druzdzel and Roger R. Flynn Decision support systems, Decision Systems Laboratory School of Information Sciences and Intelligent Systems Program, University of Pittsburgh, Encyclopedia of Library and Information Science, Second Edition, 2002

[Hofstadter, 1985] Hofstadter D. Gödel Escher, Bach : les brins d'une guirlande éternelle, trad. française, Paris, Inter-éditions, 1985.

[Piton, 2011] Thomas Piton, Une Méthodologie de Recommandations Produits Fondée sur l'Actionnabilité et l'Intérêt Économique des Clients Application à la Gestion de la Relation Client du groupe V M Matériaux, École polytechnique de l'Université de Nantes, Octobre 2011

[Bouchon-Meunier, 1995] Bernadette Bouchon-Meunier, La logique floue et ses applications, Préface de Lotfi Zadeh, Addison-wesley France, SA, 1995.

[Mastorocostas, 2000] Mastorocostas P, Theocharis J., Kiartzis S.J. et Bakirtzis A.G. A hybrid fuzzy modeling method for short-term load forecasting. Mathematics and Computers in Simulation, 2000, vol.51, p. 221-232.

[Na, 1998] Na M.G. Design of a genetic fuzzy controller for nuclear system generator water level control. IEEE TRANS. on Nuclear Sciences, 1998, vol.45, n°4, p. 2261-2271.

[Ruan, 1998] Ruan D. et Wal A.J. Van Der. Controlling the power output of a nuclear reactor with fuzzy logic. Information Sciences, 1998, vol.110, p. 151-177.

[Kim, 1997] Kim D.Y. et Soeng P.H. Fuzzy gain scheduling of velocity PI controller with intelligent learning algorithm for reactor control. Annals of Nuclear Energy, 1997, vol.24, n°10, p. 819-827.

[Neto, 1989] Neto J.L.D.S. Contribution aux algorithmes d'adaptation par logique floue appliqués à la commande de la machine synchrone à aimants permanents. Thèse : Faculté des Etudes Supérieures : Université Laval, Québec, 1989.

[Cao, 1997] CAO M. Commande numérique de machines asynchrones par logique floue. Thèse : Faculté des études supérieures de l'université Laval, Québec: 1997.

[Takagi, 1985] Takagi T. et Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control. IEEE TRANS. on SMC, 1985, vol.15, n°1, p. 116-132.

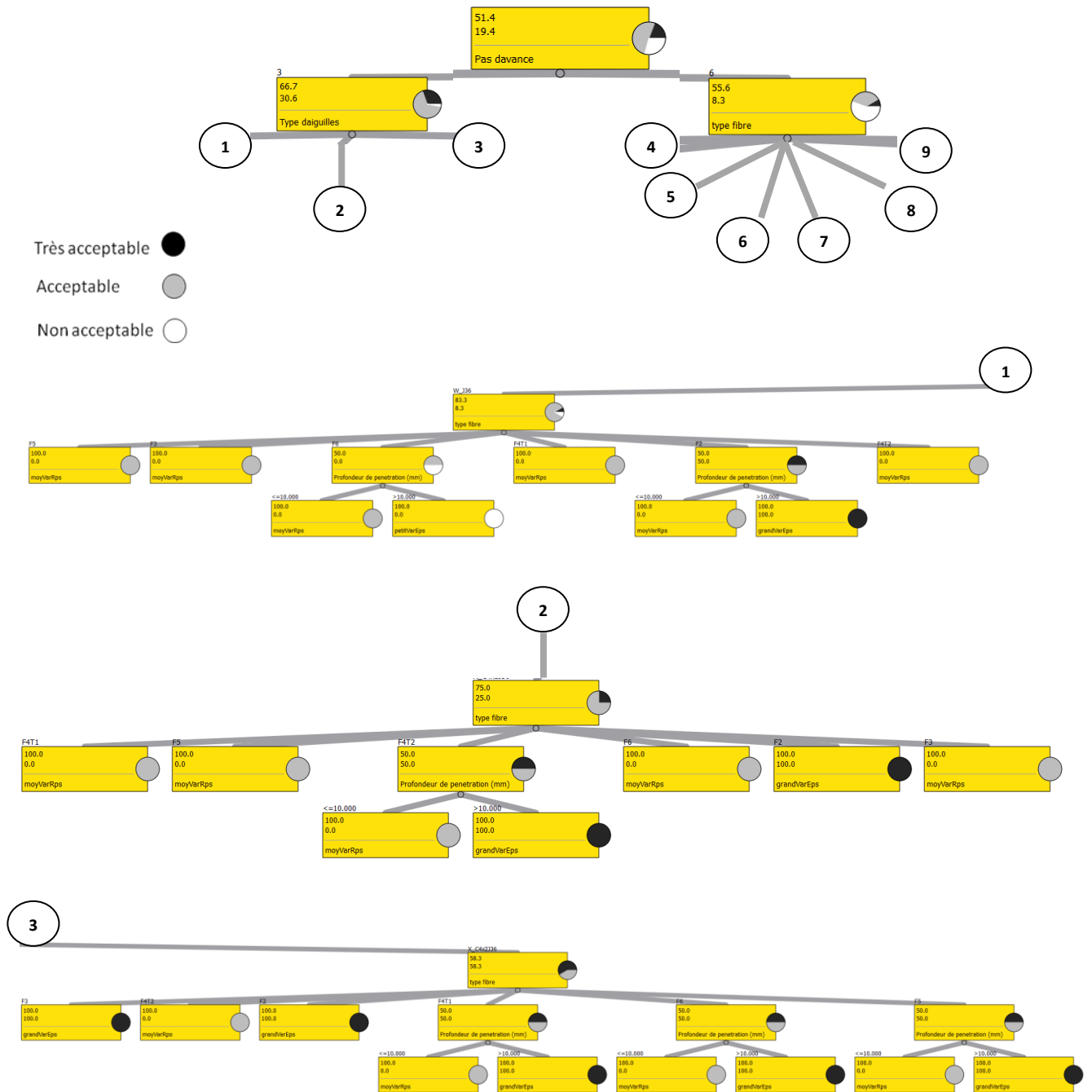
- [Mamdani, 1975] Mamdani E.H. et Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 1975, vol.7, p. 1-13.
- [Janikow, 2006] C.Z. Janikow. Exemplar learning in fuzzy decision trees. In *Proceedings of the 5th Conference on Fuzzy System*, 2006.
- [Larose, 2005] Larose Daniel T. *Discovering Knowledge in Data : An Introduction to Data Mining*, volume 1st. Wiley, Hoboken (New Jersey), USA, 2005. ISBN : 0-471-66657-2 (rel.). - 978-0-471-66657-8. pages
- [Rokach-Maimon 2008] L. Rokach, O.Z. Maimon, *Data mining with decision trees: theory and applications*, Series in Machine perception artificial intelligence, Volume 69, 2008.
- [Principe et Miikkulainen, 2009] J.C. Principe, R. Miikkulainen, *Advances in Self-Organizing Maps: 7th International Workshop, WSOM 2009, St. Augustine, FL, USA, June 2009*, Springer.
- [Vroman, 2012] P. Vroman, B. Vermeulen, O. Ezzar, *Nonwoven-based Biocomposites structures for automotive : influence of needlepunching and structural parameters on mechanical and phonic properties*, ENSAIT, NRA 2012
- [UML, 2000] P.A. Muller, N. Gaertner, *Modélisation objet avec UML*, Eyrolles 2000
- [Giroux, 2004] Giroux, P. *Langage UML : Développement de logiciel et modélisation visuelle*. 2004.
- [Roques, 2009] Roques, P. *UML 2 pour la pratique*. EYROLLES. 2009
- [Biran, 2004] Adrian Biran et Moshe Breiner, *MATLAB pour l'ingénieur : Versions 6 et 7*, Pearson Education, 2004 (ISBN 2744070254)
- [Lapresté, 2005] Jean-Thierry Lapresté, *Introduction à MATLAB*, Ellipses, 2005 (ISBN 2729824014))
- [Pope, 1988] Pope, G. E. (1988). *A Description of the Model-View-Controller User Interface Paradigm in the Smalltalk-80 System*.
- [Matlab, 2012] MATLAB® *Creating Graphical User Interfaces*, COPYRIGHT 2000–2012 by TheMathWorks, Inc.
- [Hartigan, 1979] Hartigan J. A., Wong M. A. A k-means clustering algorithm: algorithm. *Applied Statistics*, 1979, vol.28, n°1, p.100-108.
- [Brown, 2001] Brown S., Blackmon K., Cousins P. et Maylor H. *Innovation: developing new products and services*.

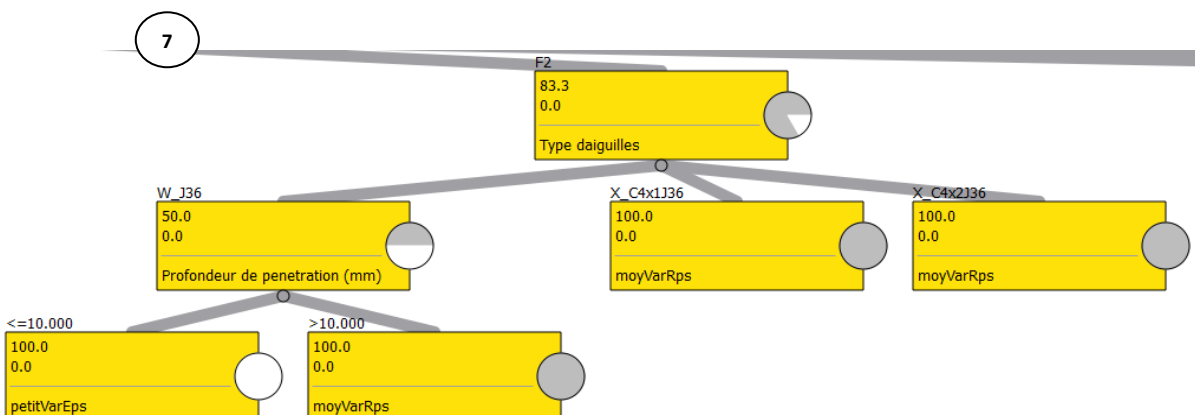
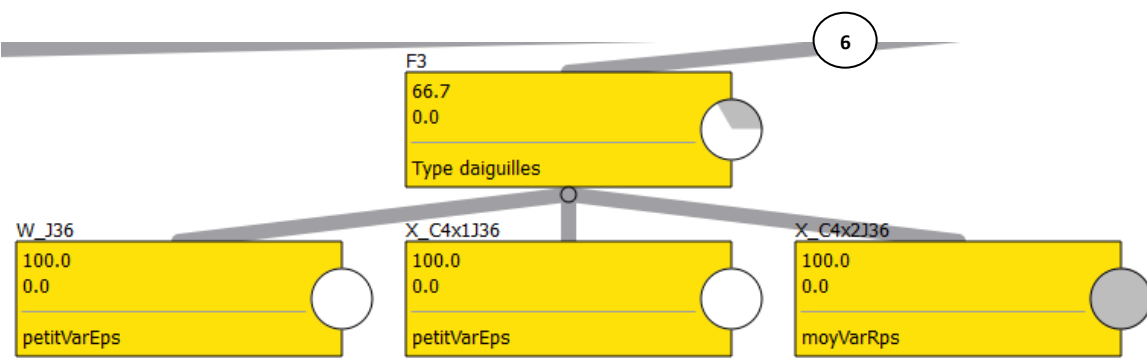
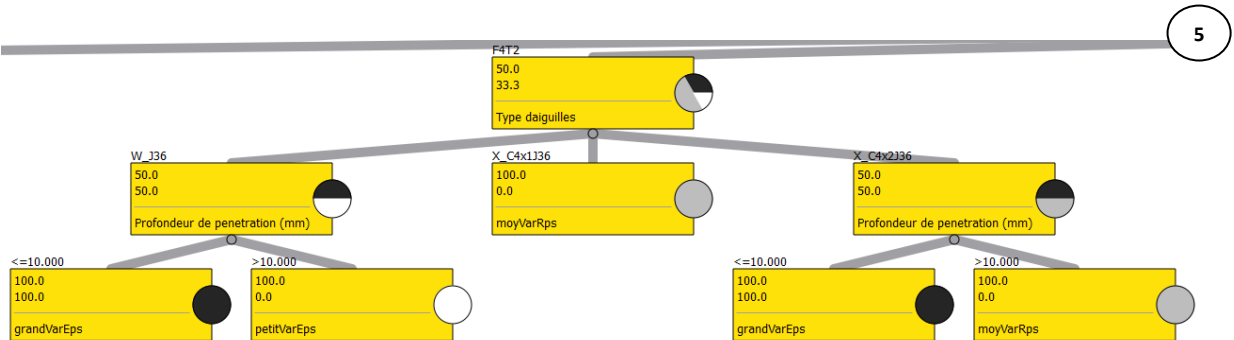
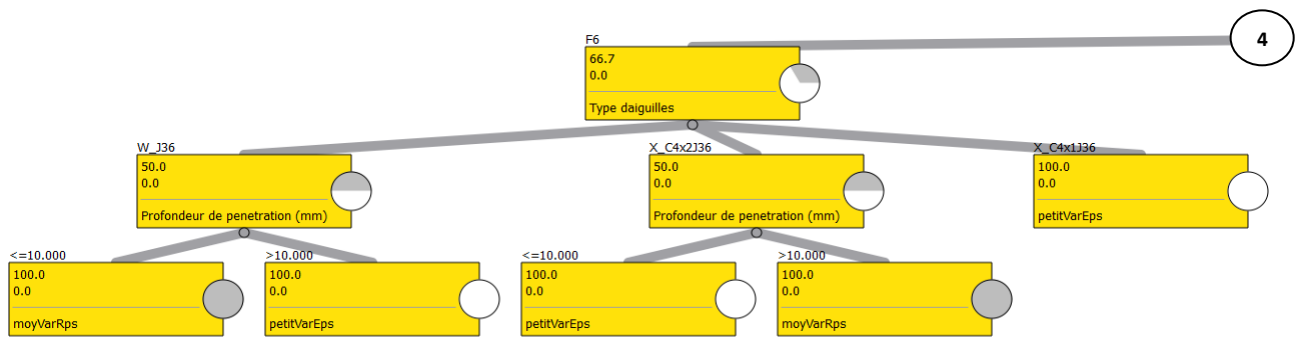
- [Laouisset, 2011b] Brahim LAOUISSET, Xianyi ZENG, Philippe VROMAN, Modélisation du procédé industriel par intégration de données d'apprentissage et de connaissance humaine, Récents Progrès en Génie des Procédés, Numéro 101 – 2011, ISSN 1775-335X - ISBN 2-910239-75-6, Ed. SFGP, Paris, France
- [ABE, 1995] S Abe.et M Lan. Fuzzy rules extraction directly from numerical data for function approximation. IEEE Trans. on SMC, 1995, vol.25, n°1, p. 119-129.
- [Thurston, 1991] D.L Thurston. A formal method for subjective design evaluation with multiple attributes. Research in Engineering Design, 1991, vol.3, p.105-112.
- [Dyer, 1992] Dyer J.S., Fishburn P.C., Steuer R.E. et Wallenius J. Multiple criteria decision making, multi-attribute utility theory: the next ten years. Management Science, 1992, vol.38, n°5, p. 645-654.
- [Hwang, 1981] Hwang C.L. et Yoon K. Multiple attribute decision making: methods and applications. 1e éd. Berlin: Springer - Verlag, 1981, 259 p.
- [Deng, 2010] Xiaoguang Deng, Philippe Vroman, XianyiZeng, Brahim Laouisset, IEEE World Congress on Computational Intelligence, Intelligent Decision Support Tools for Multicriteria Product Design, 2010
- [Ibbou, 1998] Ibbou Smail., (1998) : Classification, analyse des correspondances et méthodes neuronales, Thèse, Université Paris 1.
- [Vallin, 2002] Philippe Vallin - Daniel Vanderpooten, Aide à la décision, Une approche par les cas, Ellipses, oct. 2000 1e édition, fev. 2002 2e édition
- [Cottrell, 1997] Cottrell, M. &Rousset, P. 1997. The Kohonenalgorithm : a powerful tool for analysing and representing multidimensional quantitative et qualitative data, Proc. IWANN'97, Lanzarote. Juin 1997, J.Mira, R.Moreno-Diaz, J.Cabestany, Eds., Lecture Notes in Computer Science, n°1240, Springer, 861-871.
- [AFNOR, 1988] NF EN ISO 9092, Textiles.Nontissés. Définition. – AFNOR. 1988
- [AFNOR, 1992] DIN EN 29092, Textiles – Nonwovens – Definition– AFNOR. 1992
- [INDA, 2012] INDA – Association of the Nonwoven Fabrics Industry, Accessed on the web: <http://www.inda.org>
- [EDANA, 2008] EDANA, Applications, Accessed on the web: <http://www.edana.org/>
- [Coste, 2004] Gérard Coste, Les non-tissés, Cellule de veille technologique de Grenoble INP-Pagora, École internationale du papier, de la communication imprimée et des biomatériaux Cerig - Grenoble INP-Pagora, - EFPG/IRFIP, 2004

- [Russell, 2007] Russell, S. J. (Ed.). (2007). Handbook of nonwovens, CRC Press, ISBN 1 85573 603 9, Boca Raton
- [Watanabe, 2004] Watanabe, A. et al. (2004). Predicting the Penetrating Force and Number of Fibers Caught by a Needle Barb in Needle Punching. Textile Research Journal, Vol. 74, No. 5, (May 2004), pp. 417-425
- [Ponsolle, 1997] D. Ponsolle F. Ko, G. Némoz, Study of the needle punched fiber transfer, PCT&S Drexel University Philadelphia Philadelphia, 1997
- [Fowler, 2006] Paul A Fowler, J Mark Hughes and Robert M Elias, Biocomposites: technology, environmental credentials and market forces, Journal of the Science of Food and Agriculture, J Sci Food Agric 86:1781–1789, 2006
- [Foster, 1990] Needlepunching: A Unique Sector, John Foster Needle Co., Inc. Manitowoc, WI. 1990.
- [Wollimex, 2011] Wollimex, Needle punched floor-covering, the needle-punching principle. 2011.
- [GrozBeckert, 2005] GrozBeckert, Aiguilles à feutrer et à structurer ,GrozBeckert France, Paris. 2005.
- [Mercier, 2002] Mercier J.P., Zambelli G. et Kurz W. Le traité des matériaux volume I - introduction à la science des matériaux. 3e éd. Lausanne, Suisse: Polytechniques et Universitaires Romandes, 2002, 520 p.
- [CTT, 1994] CTT. Dictionnaire des fibres & technologies textiles. 1e éd. Saint-Hyacinthe: Centre des Technologies Textiles, Hoechst, 1994, 262 p.
- [Vroman, 2010] P. Vroman, A. Ouchen, B. Vermeulen, F. Rault, Advanced Biocomposite Structures for Automotive: Innovation and Challenges, 5th EDANA Nonwoven Research Academy Conference, November 16-17, Aachen, Germany.
- [Witten, 2010] E. Witten, The european composites market 2008/2009. JEC Comp mag, 55: 16-18.

Annexes

Annexe A :





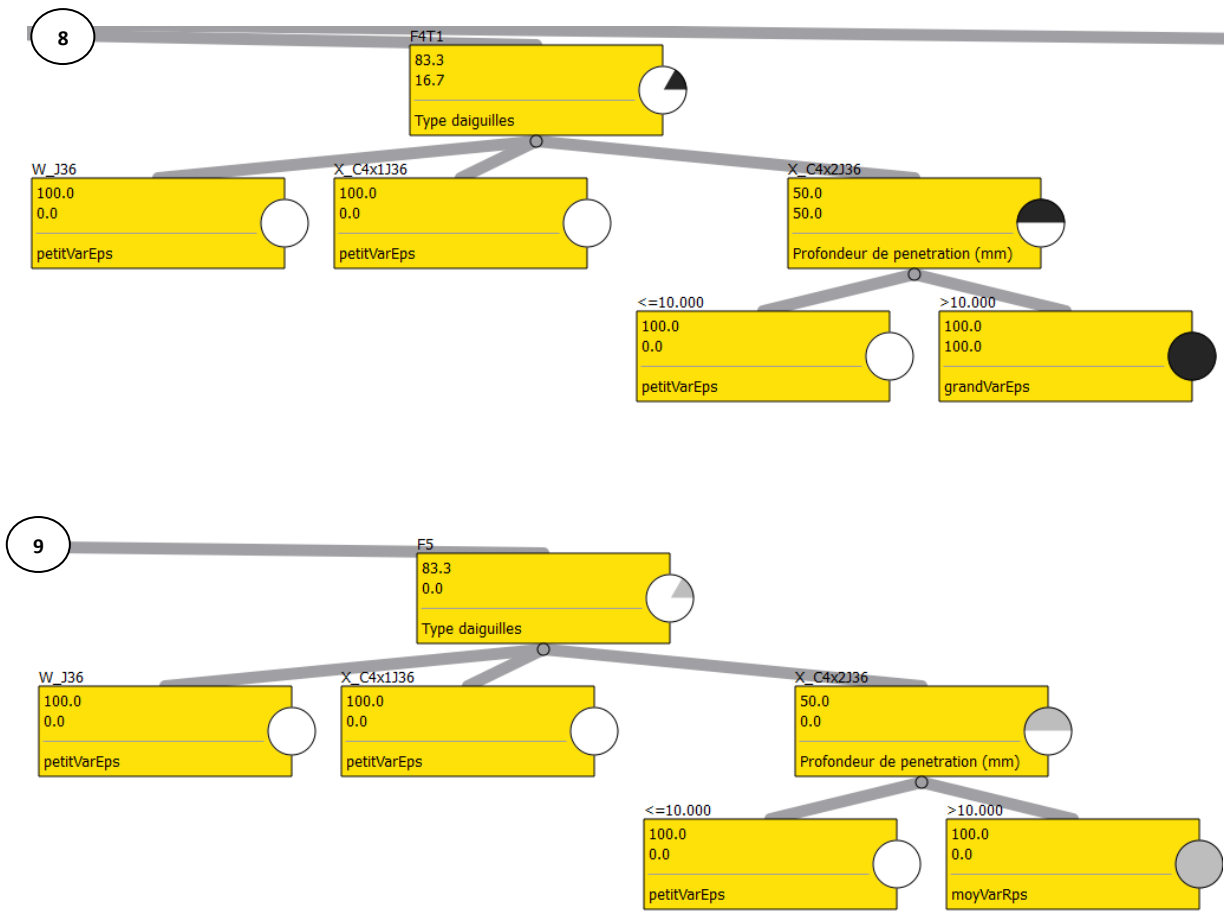
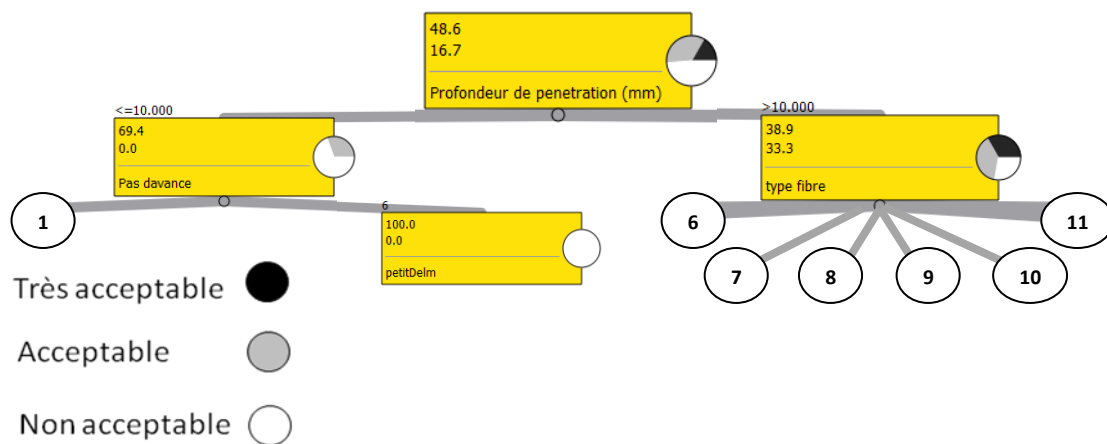
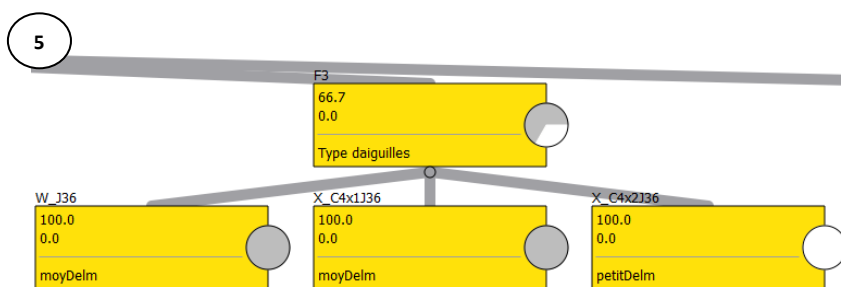
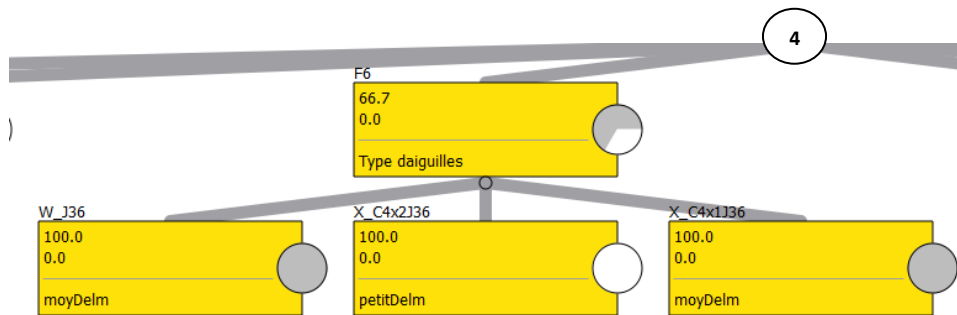
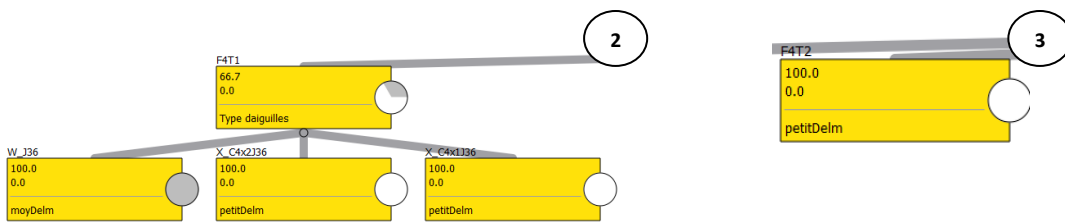
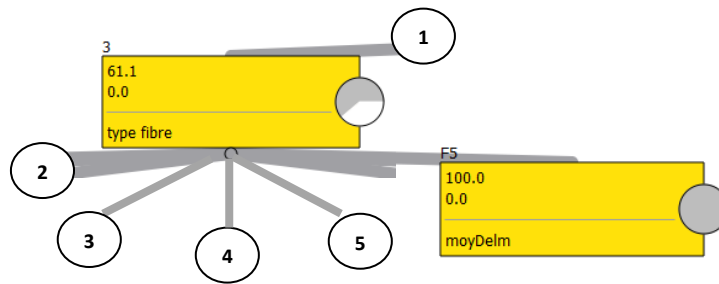
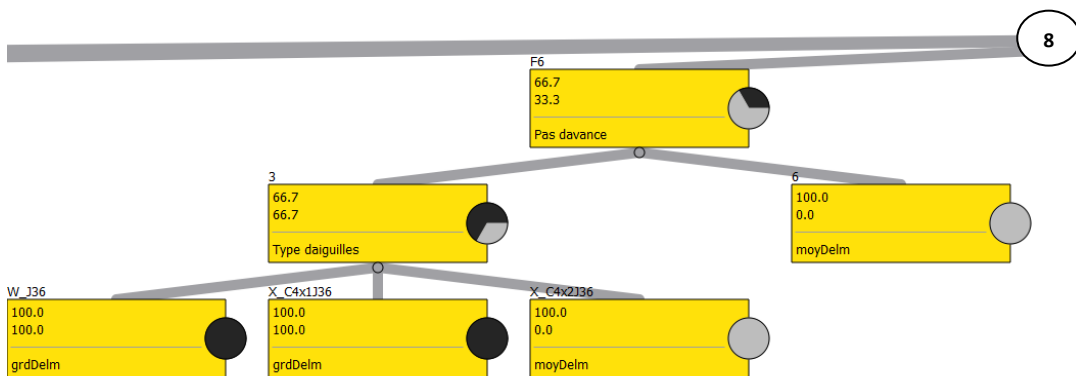
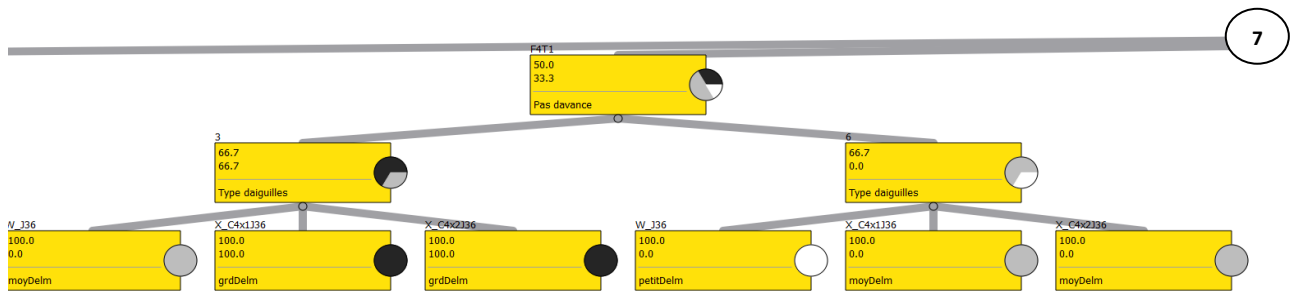
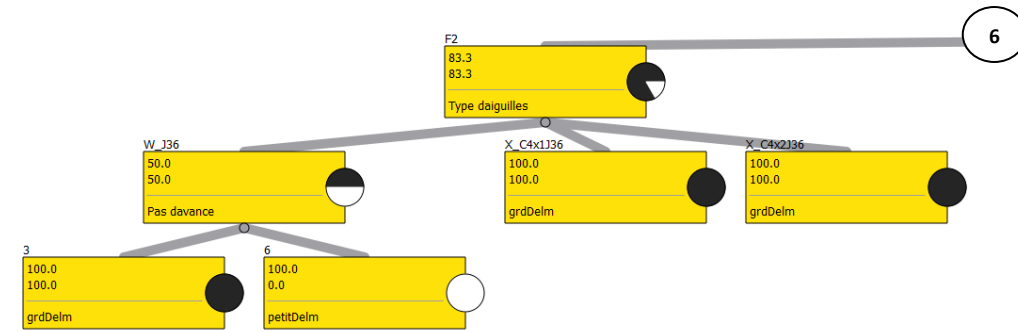


Figure 3.42. Arbre de décision généré pour la variable de sortie Y_1 (Variation d'épaisseur)







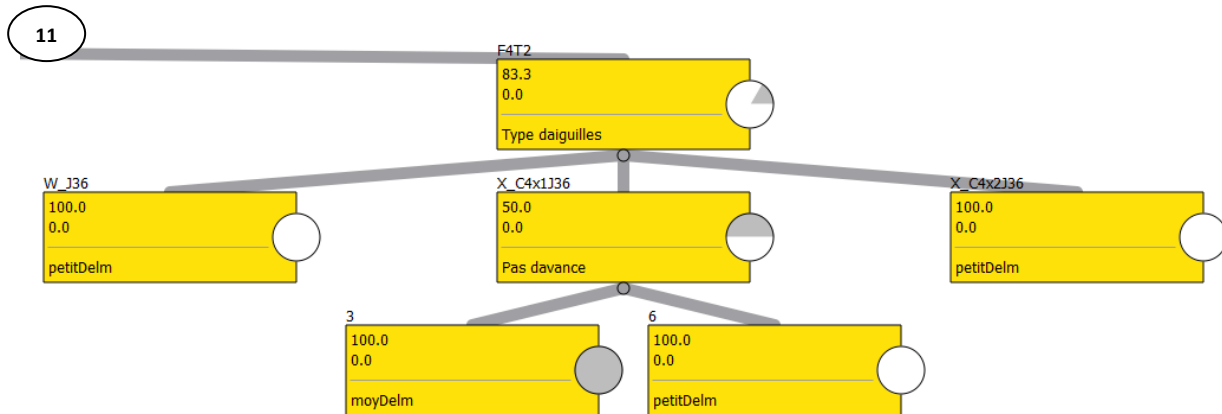
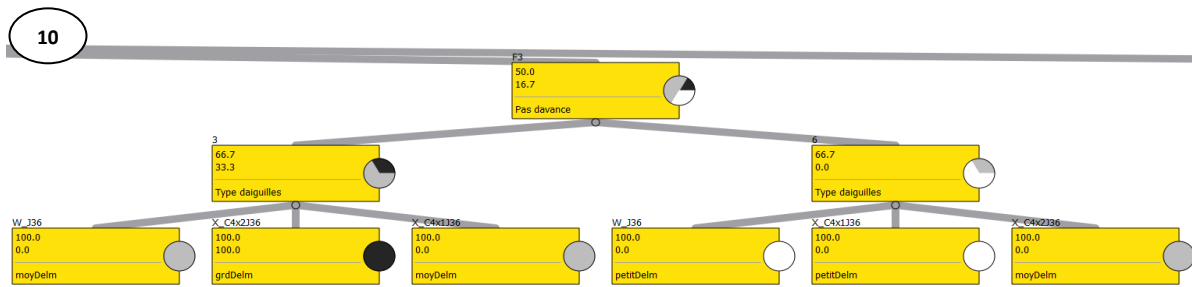
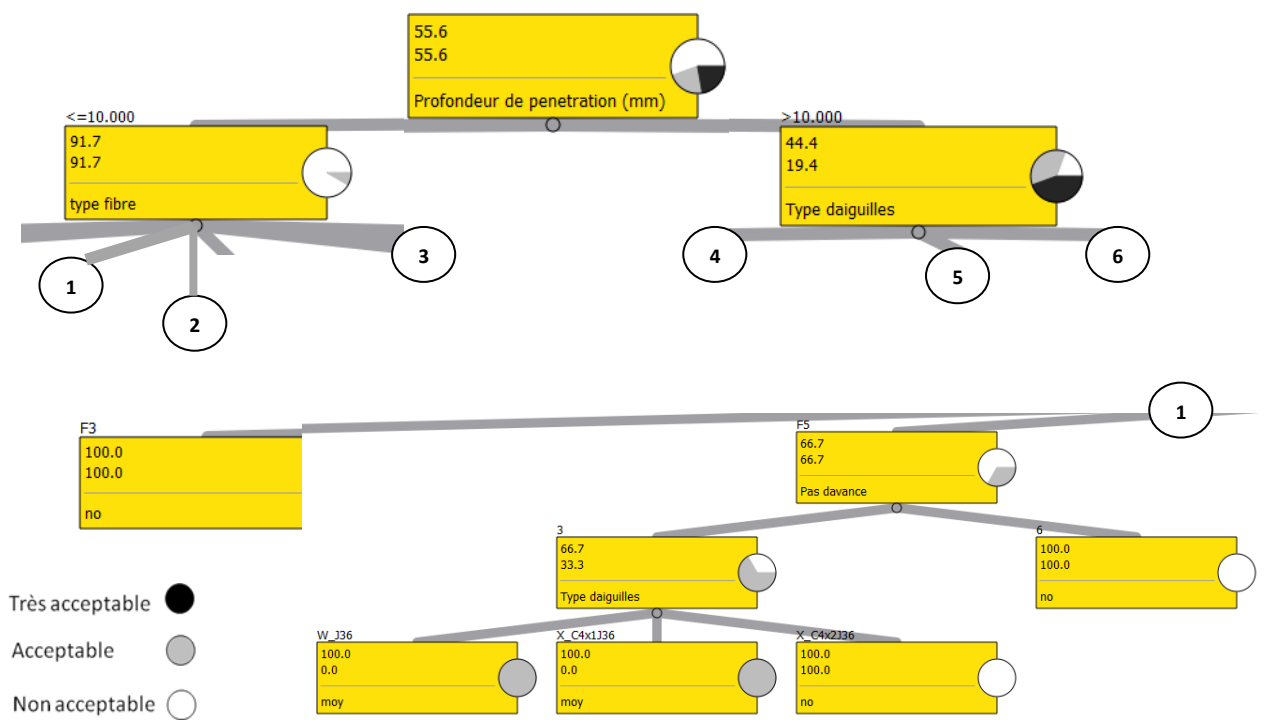


Figure 3.43. Arbre de décision généré pour la variable de sortie Y_3 (Résistance au délaminage)



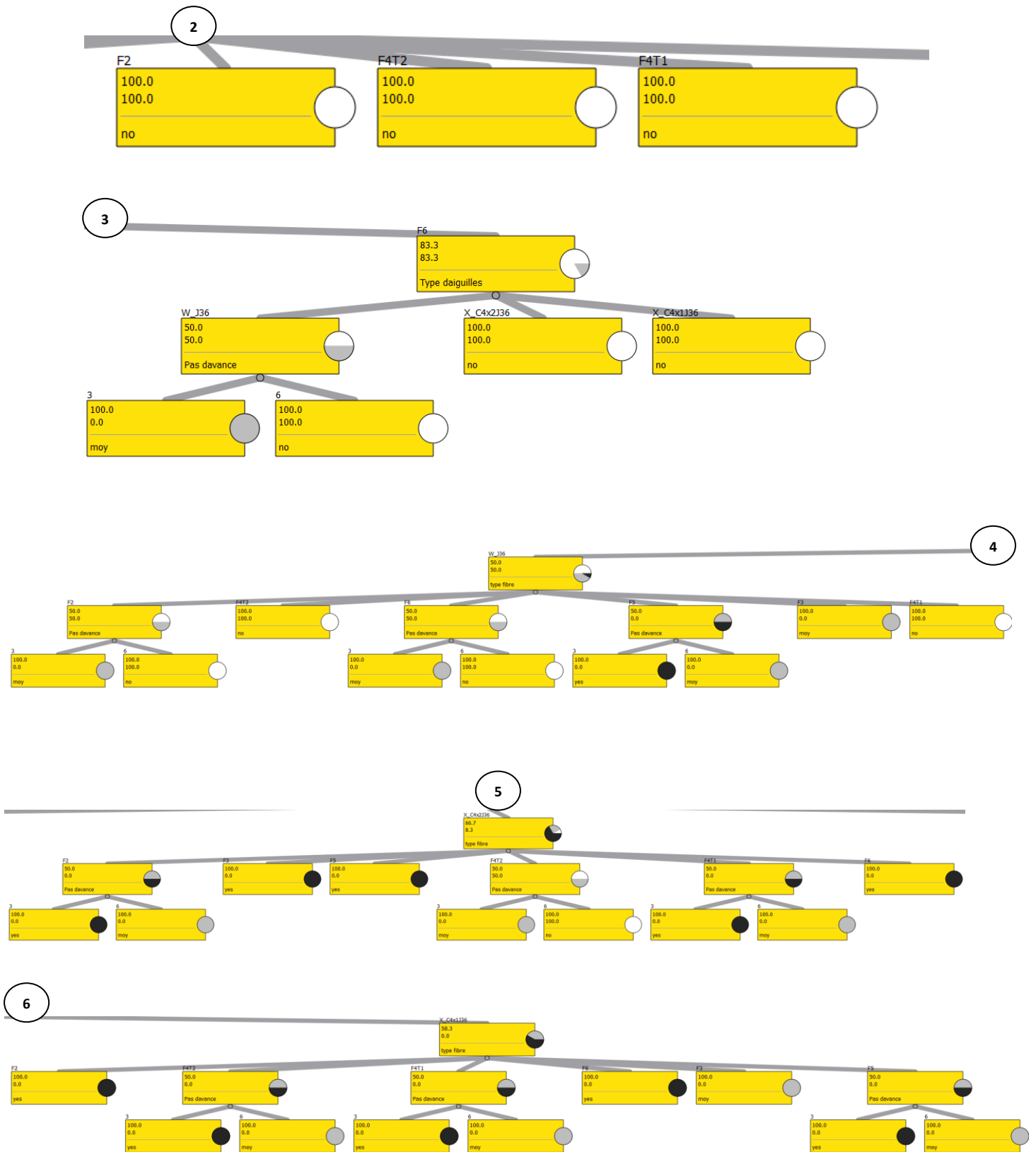


Figure 3.44. Arbre de décision généré pour la variable de sortie Y_4 (Observation visuelle)

Annexe B :

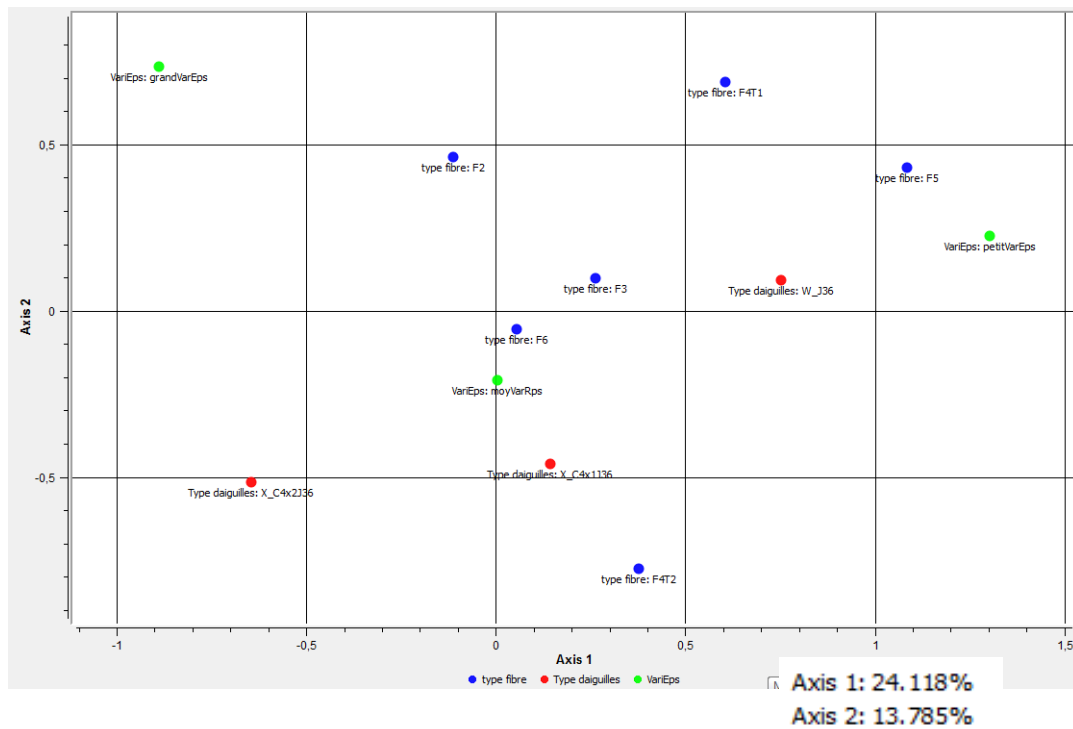


Figure 3.45. ACM pour les deux variables type d'aiguilles et type de fibre par rapport à la variation épaisseur

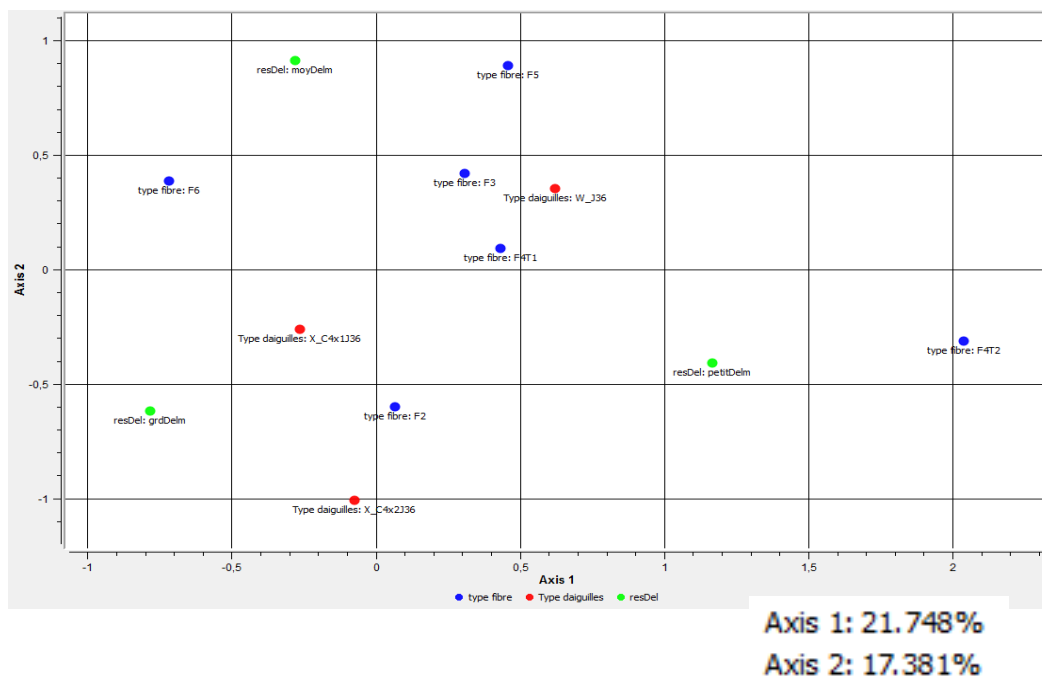


Figure 3.46. ACM pour les deux variables type d'aiguilles et type de fibre par rapport à la résistance au délaminage

Annexe C : Données expérimentales pour l'étude d'aiguilletage

| Type mélange | Type d'aiguille | Profondeur pénétration (mm) | Pas d'avance (mm/cp) | Densité d'aiguilletage (i.a./cm ²) | Variation épaisseur (%) | Résistance délaminage (Kn) | Observation visuelle |
|--------------|-----------------|-----------------------------|----------------------|--|-------------------------|----------------------------|----------------------|
| F2B1-C2 | W_J36 | 10 | 6 | 14.49 | -0.14 | 2.94 | moy |
| F3B1-A2 | X_C4x1J36 | 10 | 6 | 14.49 | -0.21 | 1.11 | moy |
| F3B1-A4 | X_C4x1J36 | 15 | 6 | 14.49 | -0.21 | 16.16 | moy |
| F3B1-C2 | W_J36 | 10 | 6 | 14.49 | -0.25 | 4.46 | moy |
| F3B1-C4 | W_J36 | 15 | 6 | 14.49 | -0.26 | 2.86 | moy |
| F4T1B1-A2 | X_C4x1J36 | 10 | 6 | 14.49 | -0.26 | 1.06 | moy |
| F4T1B1-A4 | X_C4x1J36 | 15 | 6 | 14.49 | -0.26 | 11.60 | moy |
| F4T1B1-B2 | X_C4x2J36 | 10 | 6 | 14.49 | -0.26 | 4.02 | moy |
| F4T1B1-C2 | W_J36 | 10 | 6 | 14.49 | -0.24 | 2.84 | moy |
| F4T1B1-C4 | W_J36 | 15 | 6 | 14.49 | -0.26 | 0.97 | moy |
| F4T2B1-C4 | W_J36 | 15 | 6 | 14.49 | -0.26 | 4.08 | no |
| F5B1-A2 | X_C4x1J36 | 10 | 6 | 14.49 | -0.25 | 1.28 | no |
| F5B1-A4 | X_C4x1J36 | 15 | 6 | 14.49 | -0.24 | 1.68 | no |
| F5B1-B2 | X_C4x2J36 | 10 | 6 | 14.49 | -0.23 | 0.77 | no |
| F5B1-C2 | W_J36 | 10 | 6 | 14.49 | -0.21 | 3.64 | no |
| F5B1-C4 | W_J36 | 15 | 6 | 14.49 | -0.21 | 1.47 | no |
| F6B2-A2 | X_C4x1J36 | 10 | 6 | 14.49 | -0.17 | 1.33 | no |
| F6B2-A4 | X_C4x1J36 | 15 | 6 | 14.49 | -0.26 | 0.68 | no |
| F6B2-B2 | X_C4x2J36 | 10 | 6 | 14.49 | -0.25 | 8.91 | no |
| F6B2-C3 | W_J36 | 15 | 3 | 28.99 | -0.26 | 2.85 | no |
| F6B2-C4 | W_J36 | 15 | 6 | 14.49 | -0.25 | 1.80 | no |
| F2 | X_C4x1J36 | 10 | 6 | 14.49 | -0.28 | 0.97 | no |
| F2B1-A4 | X_C4x1J36 | 15 | 6 | 14.49 | -0.33 | 2.20 | no |
| F2B1-B2 | X_C4x2J36 | 10 | 6 | 14.49 | -0.32 | 1.18 | no |
| F2B1-B4 | X_C4x2J36 | 15 | 6 | 14.49 | -0.38 | 1.23 | no |
| F2B1-C1 | W_J36 | 10 | 3 | 28.99 | -0.37 | 0.54 | no |
| F2B1-C4 | W_J36 | 15 | 6 | 14.49 | -0.28 | 4.33 | no |
| F3B1-A1 | X_C4x1J36 | 10 | 3 | 28.99 | -0.29 | 1.52 | no |
| F3B1-A3 | X_C4x1J36 | 15 | 3 | 28.99 | -0.28 | 1.27 | no |
| F3B1-B2 | X_C4x2J36 | 10 | 6 | 14.49 | -0.28 | 0.62 | no |
| F3B1-B4 | X_C4x2J36 | 15 | 6 | 14.49 | -0.32 | 5.30 | no |
| F3B1-C1 | W_J36 | 10 | 3 | 28.99 | -0.34 | 2.04 | moy |
| F3B1-C3 | W_J36 | 15 | 3 | 28.99 | -0.37 | 1.54 | moy |
| F4T1B1-A1 | X_C4x1J36 | 10 | 3 | 28.99 | -0.35 | 0.62 | moy |
| F4T1B1-A3 | X_C4x1J36 | 15 | 3 | 28.99 | -0.35 | 3.80 | moy |
| F4T1B1-B1 | X_C4x2J36 | 10 | 3 | 28.99 | -0.35 | 1.35 | moy |

| | | | | | | | |
|-----------|-----------|----|---|-------|-------|------|-----|
| F4T1B1-C1 | W_J36 | 10 | 3 | 28.99 | -0.36 | 0.63 | moy |
| F4T1B1-C3 | W_J36 | 15 | 3 | 28.99 | -0.34 | 0.30 | no |
| F4T2B1-A1 | X_C4x1J36 | 10 | 3 | 28.99 | -0.34 | 2.52 | no |
| F4T2B1-A2 | X_C4x1J36 | 10 | 6 | 14.49 | -0.29 | 1.24 | no |
| F4T2B1-A4 | X_C4x1J36 | 15 | 6 | 14.49 | -0.32 | 0.42 | no |
| F4T2B1-B1 | X_C4x2J36 | 10 | 3 | 28.99 | -0.30 | 0.24 | no |
| F4T2B1-B3 | X_C4x2J36 | 15 | 3 | 28.99 | -0.38 | 1.35 | no |
| F4T2B1-B4 | X_C4x2J36 | 15 | 6 | 14.49 | -0.32 | 0.56 | no |
| F4T2B1-C1 | W_J36 | 10 | 3 | 28.99 | -0.37 | 0.54 | no |
| F4T2B1-C3 | W_J36 | 15 | 3 | 28.99 | -0.38 | 0.28 | no |
| F5B1-A1 | X_C4x1J36 | 10 | 3 | 28.99 | -0.30 | 0.74 | no |
| F5B1-A3 | X_C4x1J36 | 15 | 3 | 28.99 | -0.29 | 0.44 | no |
| F5B1-B1 | X_C4x2J36 | 10 | 3 | 28.99 | -0.37 | 1.85 | no |
| F5B1-B4 | X_C4x2J36 | 15 | 6 | 14.49 | -0.29 | 0.57 | no |
| F5B1-C1 | W_J36 | 10 | 3 | 28.99 | -0.34 | 4.31 | no |
| F5B1-C3 | W_J36 | 15 | 3 | 28.99 | -0.34 | 1.50 | no |
| F6B2-A1 | X_C4x1J36 | 10 | 3 | 28.99 | -0.28 | 1.56 | no |
| F6B2-A3 | X_C4x1J36 | 15 | 3 | 28.99 | -0.36 | 0.50 | no |
| F6B2-B1 | X_C4x2J36 | 10 | 3 | 28.99 | -0.33 | 7.88 | no |
| F6B2-B4 | X_C4x2J36 | 15 | 6 | 14.49 | -0.30 | 2.71 | no |
| F6B2-C1 | W_J36 | 10 | 3 | 28.99 | -0.35 | 1.75 | yes |
| F6B2-C2 | W_J36 | 10 | 6 | 14.49 | -0.33 | 0.58 | yes |
| F2 | X_C4x1J36 | 10 | 3 | 28.99 | -0.40 | 3.01 | yes |
| F2B1-A3 | X_C4x1J36 | 15 | 3 | 28.99 | -0.46 | 1.12 | yes |
| F2B1-B1 | X_C4x2J36 | 10 | 3 | 28.99 | -0.39 | 1.81 | yes |
| F2B1-B3 | X_C4x2J36 | 15 | 3 | 28.99 | -0.49 | 0.76 | yes |
| F2B1-C3 | W_J36 | 15 | 3 | 28.99 | -0.44 | 5.18 | yes |
| F3B1-B1 | X_C4x2J36 | 10 | 3 | 28.99 | -0.40 | 2.66 | yes |
| F3B1-B3 | X_C4x2J36 | 15 | 3 | 28.99 | -0.41 | 0.89 | yes |
| F4T1B1-B3 | X_C4x2J36 | 15 | 3 | 28.99 | -0.49 | 0.39 | yes |
| F4T1B1-B4 | X_C4x2J36 | 15 | 6 | 14.49 | -0.38 | 3.77 | yes |
| F4T2B1-A3 | X_C4x1J36 | 15 | 3 | 28.99 | -0.41 | 1.84 | yes |
| F4T2B1-B2 | X_C4x2J36 | 10 | 6 | 14.49 | -0.25 | 2.62 | yes |
| F4T2B1-C2 | W_J36 | 10 | 6 | 14.49 | -0.30 | 1.17 | yes |
| F5B1-B3 | X_C4x2J36 | 15 | 3 | 28.99 | -0.44 | 4.72 | yes |
| F6B2-B3 | X_C4x2J36 | 15 | 3 | 28.99 | -0.39 | 1.92 | yes |

Annexe D : Données théoriques et expérimentales pour l'estimation des fibres transportées

| Mélange de fibre | F2 B1 | F2 B1 | F2 B1 | F2 B1 | F2 B1 | F2 B1 | F2 B1 | F2 B1 | F2 B1 | F2 B1 | F2 B1 | F2 B1 | F2 B1 | F2 B1 | F2 B1 | F2 B1 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Aiguilles | A | A | A | A | B | B | B | B | C | C | C | C | D | D | D | D |
| Paramètre | 1 | 3 | 2 | 4 | 1 | 3 | 2 | 4 | 1 | 3 | 2 | 4 | 1 | 3 | 2 | 4 |
| Profondeur pénétration (mm) | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 | 15 |
| Densité aiguillette (n.i./cm ²) | 29 | 29 | 14 | 14 | 29 | 29 | 14 | 14 | 29 | 29 | 14 | 14 | 29 | 29 | 14 | 14 |
| Nombre théorique de transfert | 39 | 39 | 39 | 39 | 66 | 66 | 66 | 66 | 30 | 30 | 30 | 30 | 59 | 59 | 59 | 59 |
| Nombre expérimental de transfert | 23 | 24 | 26 | 50 | 29 | 44 | 22 | 51 | 30 | 17 | 13 | 18 | 44 | 34 | 29 | 27 |
| | 29 | 27 | 37 | 22 | 24 | 30 | 22 | 38 | 40 | 19 | 17 | 31 | 40 | 64 | 17 | 24 |
| | 24 | 23 | 32 | 39 | 39 | 46 | 36 | 45 | 24 | 28 | 23 | 19 | 32 | 36 | 28 | 21 |
| | 25 | 37 | 33 | 40 | 34 | 47 | 36 | 46 | 28 | 23 | 14 | 12 | 28 | 59 | 13 | 23 |
| | 22 | 44 | 45 | 19 | 29 | 48 | 44 | 43 | 20 | 21 | 16 | 21 | 29 | 29 | 19 | 29 |
| moyenne | 24.6 | 31 | 34.6 | 34 | 31 | 43 | 32 | 44.6 | 28.4 | 21.6 | 16.6 | 20.2 | 34.6 | 44.4 | 21.2 | 24.8 |

Annexe E : Caractéristiques des structures nontissées

| Références | Epaisseur composite visée | Structures | Fibres Naturelles | | | Polymères | | | Nontissés | | | |
|------------|---------------------------|-------------|---------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------|----------|------------------------------|---|----------------|--------------------------------------|-----|
| | | | Fibre Naturelle (%) | Nature | Densité (g/cm ³) | Fibre Synthétique (%) | Nature | Densité (g/cm ³) | Masse surfacique réel (g/m ²) | Epaisseur (mm) | Masse volumique (Kg/m ³) | |
| BC1 | 1,5 | Aiguilletés | 50% | Lin Etoupe | 1,48 | 50% | PP | 0,91 | 1542 | 6,83 | 225 | |
| | 2 | | 50% | Lin Etoupe | 1,48 | 50% | PP | 0,91 | 1519 | 6,68 | 227 | |
| BC2 | 1,5 | | 60% | Lin Etoupe | 1,48 | 40% | PP | 0,91 | 1441 | 6,83 | 210 | |
| | 2 | | 60% | Lin Etoupe | 1,48 | 40% | PP | 0,91 | 1483 | 6,62 | 224 | |
| BC3 | 1,5 | | 70% | Lin Etoupe | 1,48 | 30% | PP | 0,91 | 1541 | 6,46 | 238 | |
| | 2 | | 70% | Lin Etoupe | 1,48 | 30% | PP | 0,91 | 1547 | 6,41 | 241 | |
| BC4 | 1,5 | | 70% | Lin Etoupe | 1,48 | 30% | PLA | 1,25 | 1638 | 6,77 | 241 | |
| | 2 | | 70% | Lin Etoupe | 1,48 | 30% | PLA | 1,25 | 1531 | 6,72 | 227 | |
| BC5 | 1,5 | | Aiguilleté | 50% | Lin Filasse 80mm | 1,48 | 50% | PP | 0,91 | 1539 | 9,82 | 156 |
| | 2 | | | 50% | Lin Filasse 80mm | 1,48 | 50% | PP | 0,91 | 1498 | 9,41 | 159 |
| BC5b | 1,5 | Aiguilleté | 50% | Lin Filasse 120mm | 1,48 | 50% | PP | 0,91 | 1576 | 9,9 | 159 | |
| | 2 | | 50% | Lin Filasse 120mm | 1,48 | 50% | PP | 0,91 | 1589 | 9,64 | 164 | |
| BC5c | 1,5 | | 50% | Lin Filasse Affiné | 1,48 | 50% | PP | 0,91 | 1519 | 9,96 | 152 | |
| | 2 | | 50% | Lin Filasse Affiné | 1,48 | 50% | PP | 0,91 | 1574 | 9,88 | 159 | |
| BC7 | 1,5 | Aiguilleté | 40% | Lin Filasse 80mm | 1,48 | 60% | PLA | 1,25 | | | | |
| | 2 | | 40% | Lin Filasse 80mm | 1,48 | 60% | PLA | 1,25 | | | | |
| BC8 | 1,5 | Aiguilleté | 50% | Lin Filasse 80mm | 1,48 | 50% | PA1 1 | 1,03 | 1825 | 10,55 | 172 | |
| | 2 | | 50% | Lin Filasse 80mm | 1,48 | 50% | PA1 1 | 1,03 | 1803 | 10,61 | 169 | |
| VRPP | 1,5 | Aiguilleté | 50% | Fibre de Verre | 2,5 | 50% | PP | 0,91 | 1230,2 | 6,03 | 204 | |
| | 2 | | 50% | Fibre de Verre | 2,5 | 50% | PP | 0,91 | 1223,1 | 5,64 | 216 | |

Annexe F : Résultats expérimentales des produits biocomposites

| Echantillon | Masse surfacique réel (g/m ²) | Epaisseur (mm) | Mass volumique (kg/m ³) | Porosité (%) | Fraction Vol, Lin (%) | Fraction Volumiques Résine (%) | Contrainte Traction (Mpa) | Module Flexion (Mpa) | Résistance Choc (KJ/m ²) | Absorption Acoustique (%) |
|-------------|---|----------------|-------------------------------------|--------------|-----------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| BC1-1,5 | 1544.53 | 1.58 | 976.32 | 1337.2 | 33.0 | 53.6 | 34.39 | 1945 | 15.27 | 9.54 |
| BC1-2 | 1508.80 | 2.00 | 752.90 | 33.2 | 25.4 | 41.4 | 25.51 | 1346 | 17.88 | 12.74 |
| BC2-1,5 | 1401.67 | 1.50 | 936.95 | 20.8 | 38.0 | 41.2 | 32.77 | 1954 | 22.22 | 10.32 |
| BC2-2 | 1462.36 | 1.91 | 764.04 | 35.4 | 31.0 | 33.6 | 25.27 | 789 | 20.00 | 17.25 |
| BC3-1,5 | 1560.46 | 1.55 | 1008.05 | 19.1 | 47.7 | 33.2 | 36.04 | 1881 | 30.02 | 14.43 |
| BC3-2 | 1511.70 | 1.97 | 767.36 | 38.4 | 36.3 | 25.3 | 24.49 | 1129 | 28.18 | 21.72 |
| BC4-1,5 | 1578.91 | 1.79 | 883.06 | 37.0 | 41.8 | 21.2 | 34.84 | 3157 | 20.43 | 21.55 |
| BC4-2 | 1502.10 | 2.00 | 750.30 | 46.5 | 35.5 | 18.0 | 23.50 | 1376 | 15.59 | 25.75 |
| BC5-1,5 | 1487.28 | 1.52 | 981.06 | 13.0 | 33.1 | 53.9 | 47.39 | 2681 | 18.43 | 11.08 |
| BC5-2 | 1475.03 | 2.00 | 738.26 | 34.5 | 24.9 | 40.6 | 35.84 | 1485 | 14.18 | 20.30 |
| BC5b-1,5 | 1481.67 | 1.55 | 958.39 | 15.0 | 32.4 | 52.7 | 45.82 | 2382 | 15.38 | 6.00 |
| BC5b-2 | 1595.04 | 1.96 | 812.14 | 27.9 | 27.4 | 44.6 | 39.33 | 1613 | 16.76 | 12.77 |
| BC5c-1,5 | 1480.35 | 1.51 | 982.97 | 12.8 | 33.2 | 54.0 | 49.78 | 2242 | 24.06 | 9.76 |
| BC5c-2 | 1563.81 | 1.96 | 798.68 | 29.1 | 27.0 | 43.9 | 41.93 | 1480 | 18.74 | 12.77 |
| BC7-1,5 | 1420.23 | 1.49 | 953.18 | 28.5 | 25.8 | 45.8 | 45.79 | 3674 | 12.59 | 16.04 |
| BC7-2 | 1482.65 | 1.93 | 769.81 | 42.2 | 20.8 | 37.0 | 30.63 | 1719 | 9.95 | 17.13 |
| BC8-1,5 | 1696.07 | 1.60 | 1058.73 | 17.8 | 35.8 | 46.4 | 61.27 | 4324 | 11.79 | 6.89 |
| BC8-2 | 1886.71 | 2.08 | 907.95 | 29.5 | 30.7 | 39.8 | 50.44 | 2968 | 13.22 | 10.76 |
| VRPP-1,5 | 1269.27 | 1.53 | 829.59 | 37.8 | 16.6 | 45.6 | 32.13 | 1469 | 32.63 | 11.23 |
| VRPP-2 | 1222.41 | 2.08 | 587.70 | 56.0 | 11.8 | 32.3 | 18.20 | 949 | 27.16 | 13.25 |