

MEMOIRE

présenté à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

pour l'obtention de l'

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

en spécialité

AUTOMATIQUE & INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

par

Ludovic KOEHL

**Optimisation de la qualité et du confort des produits
textiles par exploitation de données physiques et
de la connaissance humaine**

Soutenu le 11 décembre 2006 devant la commission d'examen :

M. C. VASSEUR	Président
Mme B. BOUCHON-MEUNIER	Rapporteur
MM. P. BORNE	Rapporteur
G. STYLIOS	Rapporteur
E. DEVAUX	Examineur
M. BAYART	Examineur
C. DUBIEF	Examineur
X. ZENG	Directeur de Recherche

REMERCIEMENTS

Ce mémoire a été préparé au Laboratoire de GENie et Matériaux TEXtiles (GE.M.TEX) de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles de ROUBAIX (E.N.S.A.I.T), sous la Direction scientifique de Monsieur Xianyi Zeng, Professeur à l'E.N.S.A.I.T. Je tiens à lui adresser mes plus vifs remerciements pour avoir initié mes premiers pas en Recherche, communiqué sa passion pour notre métier et guidé mes travaux et partagé ses compétences depuis 1994.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur Christian Vasseur, Professeur des Universités à l'Université des Sciences et Technologies de Lille, pour toute l'attention qu'il n'a cessé de me prodiguer au cours de ma carrière depuis la Direction de mes travaux de thèse de doctorat jusqu'à ce jour où il me fait l'honneur de Présider mon habilitation.

Je suis très sensible à l'honneur que me fait Monsieur Pierre Borne, Professeur à l'Ecole Centrale de LILLE, pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter au jugement de ce mémoire en acceptant d'être un de mes rapporteurs aujourd'hui, alors qu'il avait déjà accepté d'examiner mes travaux de thèse en 1998.

J'exprime toute ma reconnaissance à Madame Bernadette Bouchon-Meunier, Directeur de Recherche CNRS au Laboratoire d'Informatique de Paris VI, pour l'honneur qu'elle me témoigne en jugeant mes travaux en qualité de rapporteur.

J'adresse toute ma reconnaissance à Monsieur Georges Stylios, Professeur à l'Ecole de textiles et conception de l'Université d'Heriot Watt (Royaume-Uni), pour avoir accepté de juger le contenu de ce mémoire et pour sa présence parmi les membres du Jury en qualité de rapporteur.

Mes remerciements s'adressent aussi à Madame Mireille Bayart, Professeur à Polytech'Lille, Professeur Eric Devaux, Directeur du laboratoire GE.M.TEX et Claude Dubief, Directeur du Centre International de Recherche Appliquée Capillaire auprès de la société L'OREAL Paris pour avoir aimablement accepté d'examiner ce mémoire.

Enfin, je souhaite remercier tout le personnel de l'E.N.S.A.I.T pour l'aide précieuse et le soutien qu'ils m'ont toujours apporté et l'amitié qu'ils me témoignent.

1	Introduction générale.....	1
1.1	Activités d'Enseignement	1
1.2	Activités de Recherche.....	2
1.3	Thèmes de Recherche.....	4
1.3.1	Présentation des thèmes	4
1.3.2	Analyse et discussion	6
1.3.3	Production Scientifique (58 références).....	7
1.3.3.1	Publications dans des revues (19 références).....	7
1.3.3.2	Communications dans des congrès avec actes (39 références).....	9
1.3.3.3	Conférences invitées (7 références)	12
1.3.4	Encadrement de recherche (15 références)	12
1.3.4.1	Codirections de thèses de doctorat (6 références).....	12
1.3.4.2	Encadrements de DEA (9 références)	13
1.4	Rayonnement Scientifique	14
1.4.1	Activité de relecture	14
1.4.2	Rayonnement national et international.....	15
1.5	Activités Administratives et d'Intérêts Collectifs	16
1.5.1	Relations internationales	17
1.5.2	Coordination de la recherche.....	18
1.5.3	Coopérations industrielles et valorisation	18
1.6	Conclusion.....	20
2	Présentation des thèmes de recherche	21
2.1	Introduction	21
2.2	Présentation des travaux réalisés dans le thème 1	21
2.2.1	Introduction de nouvelles méthodes de mesure précises des paramètres de structure adaptés aux matériaux textiles.....	25
2.2.1.1	Méthodes de mesures basées sur l'analyse d'images des matériaux textiles.....	26
2.2.2	Sélection des paramètres de structure pertinents par rapport à l'application retenue avec introduction de la connaissance humaine.....	35
2.2.3	Modélisation de systèmes complexes par les techniques floues	42
2.2.3.1	Construction d'un modèle flou de type ABE	44
2.2.3.2	Optimisation de la structure et des paramètres internes d'un modèle flou ..	49
2.2.4	Analyse et discussion	53
2.3	Présentation des travaux réalisés dans le thème 2.....	53
2.3.1	Introduction	53
2.3.2	Formalisation, normalisation et analyse des données sensorielles.....	58
2.3.3	Normalisation de données sensorielles	58
2.3.4	Définition de distances et de sensibilité inter et intra-panels.....	63
2.3.5	D'une valeur numérique précise de distance à une distance floue.....	64
2.3.6	Traitement de données sensorielles exprimée par des consommateurs	66
2.3.7	Système de démonstration d'évaluation sensorielle en ligne.....	72
2.3.8	Analyse et discussion	76
3	Perspectives des travaux de recherche	78
4	Conclusion générale	81
	Bibliographie.....	82
	Annexe.....	86

PREAMBULE

Titulaire d'un titre d'ingénieur textile de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles (ENSAIT) de Roubaix en 1994, j'ai poursuivi en parallèle de ma troisième année d'Ecole, un Diplôme d'Etudes Approfondies en Automatique et Informatique Industrielle à l'Université des Sciences et Technologies de Lille-I (USTL). Depuis 1998, j'ai obtenu un titre de docteur en automatique et informatique industrielle de l'USTL. Mon cursus universitaire m'a permis d'acquérir une double culture scientifique à la fois des compétences en Génie Textile et en Automatique. Mes domaines de compétences qui concernent la reconnaissance de formes, l'analyse de données, la modélisation et l'application de ses techniques, je l'ai ai mises au service de l'industrie textile. Mes activités de recherche ont été développées au sein de l'équipe du laboratoire GEMTEX (GÉNIE et Matériaux TEXtiles) intitulée "Aide à la conception pour la qualité des produits et procédés textiles" sous la Direction scientifique du Professeur Xianyi Zeng.

Ce mémoire décrit l'ensemble de mes activités d'enseignant-chercheur depuis ma nomination en tant que Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles (ENSAIT) de Roubaix, en septembre 1998, jusqu'à ce jour.

La première partie du document constitue une synthèse présentant :

- mes activités d'enseignement,
- mes activités de recherche,
- mes activités administratives et d'intérêts collectifs.

L'ensemble de mes cours, travaux dirigés et travaux pratiques est dispensé à l'ENSAIT, Grande Ecole qui prépare les étudiants à l'obtention d'un titre d'ingénieur en textile. C'est en partie mes compétences dans ce domaine qui sont majoritairement mises à profit au sein de l'établissement.

Mes travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre de la personnalisation de masse (Mass Customization) des produits industriels issus de l'industrie textile. Dans un contexte de compétition économique exacerbé, le consommateur prend une place grandissante et impose aux industriels de recourir à une conception personnalisée de leurs produits en parfaite adéquation avec les attentes de leurs clients en terme de propriétés fonctionnelles et de confort, tout en diminuant les temps de conception sans renchérir les coûts de fabrication. Cette réponse personnalisée dans la conception des produits appelle les entreprises non seulement à adapter leur outil de production pour le rendre plus flexible et donc à comprendre parfaitement les interactions entre les propriétés espérées sur le matériau et leur structure, mais aussi à optimiser la chaîne logistique dans le sens d'une intégration d'outils performants qui offrent une aide à la décision rapide à tous les stades de fabrication sur la qualité des produits. Depuis mes premiers travaux de recherche en DEA d'automatique, mes activités consistent à explorer de nouvelles pistes de recherche pour observer, mesurer les propriétés des matériaux souples afin de les corrélérer avec les outils de production ou encore de les interpréter en fonction de la qualité et du confort attendus. L'observation des systèmes par les données et les mises en corrélations font appel aux outils de type "soft-computing". Dans le domaine des matériaux textiles, la nature des données les rend souvent incertaines et imprécises. En effet, les procédés de transformation sont très complexes et se prêtent difficilement à la mise en place de plans d'expériences. La caractérisation des propriétés physico-chimiques des matériaux souples est, pour certaines d'entre elles, particulièrement délicate surtout au niveau de leur structure. Enfin, la qualité et le confort des matériaux

textiles au niveau industriel sont encore très souvent jugés subjectivement, faisant largement appel à la connaissance des opérateurs pour le réglage des procédés et les industriels connaissent de grandes difficultés pour les traduire dans un cahier des charges. En conséquence, une très forte attente industrielle concerne l'interprétation de mesures physico-chimiques réalisées sur le matériau textile et sa traduction en terme de cahier des charges et de réglage des procédés de transformation complexes. Cette bonne compréhension des mécanismes qui guident la qualité des matériaux textiles, alliée à sa traduction correcte dans le cahier des charges et le réglage de l'outil industriel, est en mesure d'offrir une flexibilité optimale à la conception personnalisée des produits. La réponse à toutes ces attentes passe par l'intégration à la fois de connaissances humaines et quantitatives pour juger et améliorer à la fois la qualité des matériaux ou encore régler les procédés de transformation.

A partir de problèmes concrets spécifiques empruntés à l'industrie textile, j'ai pu développer des approches génériques où la souplesse et l'interprétation physique occupent une place prépondérante. C'est ainsi que sont abordés, dans mes travaux, les deux aspects suivants :

- Caractérisation des structures des matériaux textiles et aide à leur conception par exploitation de données mesurées et intégration de la connaissance humaine,
- Evaluation sensorielle des produits textiles par des techniques de calcul avancé.

Ces deux axes sont supportés par l'intégration de la connaissance humaine comme un support d'aide à la décision, de classification ou encore pour compléter des mesures physiques sur les matériaux lorsque les sources d'informations disponibles sont très réduites. Connaissances humaines pour la définition et la caractérisation des structures complexes des matériaux textiles, pour l'ajustement des paramètres de réglage des procédés de transformation, la définition de règles floues ou encore pour l'analyse de données sensorielles issues de panels multiples pour l'étude du confort. A l'avenir, notre souhait serait de transmettre une information sensorielle, en particulier tactile, par un autre support tel que l'image, toujours avec le souci d'aller plus loin dans la conception personnalisée des produits.

La première partie du mémoire sera consacrée à la présentation générale. Les deux axes de recherche seront détaillés dans la seconde partie du mémoire. Enfin, la troisième partie du document sera consacrée aux orientations que je compte donner à mes travaux de recherche dans les prochaines années.

PARTIE I

PRESENTATION GENERALE

1 INTRODUCTION GENERALE

1.1 ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

Ma carrière d'enseignant a démarré en décembre 1994, pour une durée de deux ans, en qualité de Coopérant du Service National à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir (ENIM, Université de Monastir) en Tunisie au sein du département de génie textile. Cette Ecole d'Ingénieurs en Génie Textile a démarré en 1994 et s'est montée avec notre aide sous la Direction de Professeur Mohamed El Baker Rammah, Président de l'Université de Monastir. Mon enseignement s'est poursuivi à l'ENSAIT par un poste d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche pour une durée de deux ans de septembre 1996 à août 1998. Depuis ma nomination au poste de Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles (ENSAIT) en septembre 1998, je me suis essentiellement engagé dans les activités d'enseignement de trois départements de l'ENSAIT : Génie textile, Info-design et logistique. Depuis huit ans, j'assure des cours magistraux, des travaux dirigés et des travaux pratiques dans ces trois départements. Je participe également à l'enseignement d'un cours magistral pour le Master "Matériaux et procédés textiles" co-habilité entre l'ENSAIT et l'ENSAM¹.

Depuis 1998, j'ai encadré plus d'une vingtaine d'étudiants en mémoire de fin d'études en collaboration très étroite avec des entreprises industrielles comme SITEX², Nylstar, Unilever, Autoliv, DIM SA, WELL, THUASNE, FREUDENBERG et d'autres écoles ou universités textiles comme l'ENSITM³ (Mulhouse), l'IFM⁴ (Paris), l'EBI⁵ (Paris), l'Université de Shinshu (Japon), l'Université d'Etat de Caroline du Nord (NCSSU, USA). Sur la vingtaine de projets de fin d'études, dix ont été contractualisés pour des montants compris entre 4000€ et 13000€.

Tous les cours à l'ENIM correspondent à des créations de cours et se résument de la façon suivante :

Discipline : Intelligence Artificielle

Cours Magistraux :

- Elèves-ingénieurs 5^{ième} année, 15 H

Discipline : Génie Textile (Filature, Métrologie Textile)

Cours Intégrés (Cours Magistraux et TD) :

- Elèves-ingénieurs 2^{ième} année, 67,5 H

Travaux Pratiques :

- Elèves-ingénieurs 2^{ième} année, 225 H

Discipline : Encadrement de Projets de Fin d'Etudes

- Elèves-ingénieurs 3^{ième} année, 30 H

¹ ENSAM : Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Lille

² SITEX : Société Industrielle des Textiles, Sousse, Tunisie

³ ENSITM : Ecole Nationale Supérieure des Industries Textiles de Mulhouse

⁴ IFM : Institut Français de la Mode, Paris

⁵ EBI : Ecole de Biologie Industrielle, Cergy-Pontoise

Mon programme d'enseignement à l'ENSAIT se résume comme suit :

Discipline : Génie Textile (Filature et Non-Tissés)

Le cours de filature était déjà enseigné. Le cours de non-tissés correspond à une création de cours à l'ENSAIT.

Cours Magistraux :

- Elèves-ingénieurs 1^{ère} année, 6,66 H
- Elèves-ingénieurs 2^{ième} année, 4 H
- Apprentis-ingénieurs 3^{ième} année, 6 H
- Elèves-ingénieurs 3^{ième} année, 8 H

Travaux Dirigés :

- Apprentis-ingénieurs 1^{ère} année, 18 H
- Elèves-ingénieurs 1^{ère} année, 38 H
- Elèves-ingénieurs 2^{ième} année, 12 H

Travaux Pratiques :

- Apprentis-ingénieurs 1^{ère} année, 16 H
- Elèves-ingénieurs 1^{ère} année, 8 H
- Apprentis-ingénieurs 2^{ième} année, 16 H
- Elèves-ingénieurs 2^{ième} année, 8 H
- Elèves-ingénieurs 3^{ième} année, 12 H

Discipline : Traitement de Données (Automatique)

Le cours de traitement de données correspond à une création de cours à l'ENSAIT

Cours Magistraux :

- Elèves-ingénieurs 3^{ième} année, 12 H

Travaux Dirigés :

- Elèves-ingénieurs 3^{ième} année, 4 H

Discipline : Cours sur la Structure des Matériaux Textiles - Master "Matériaux et procédés textiles"

Ce cours correspond à une création de cours

Cours Magistraux :

- Etudiants 3^{ième} cycle, 4 H

Mon programme d'enseignement comprend en moyenne un volume annuel d'environ 200 HTD, dispensé essentiellement du niveau licence au niveau Mastère.

1.2 ACTIVITES DE RECHERCHE

Mes travaux de recherche ont débuté en février 1994 dans le cadre de la préparation de mon DEA en Automatique et Informatique Industrielle sur la caractérisation de la structure poreuse dans un fil. Depuis mes travaux de recherche en DEA, je me suis impliqué dans la caractérisation de la morphologie des matériaux textiles en appliquant la géométrie fractale et les techniques communément appelées "soft computing". Dans le cadre de ma thèse de doctorat, je me suis penché plus particulièrement sur l'estimation d'un paramètre de la géométrie fractale, à savoir la dimension fractale, afin de mesurer avec une grande précision la dimension fractale d'une morphologie complexe. C'est à cette occasion que nous avons pu

mettre en évidence des phénomènes d'auto-affinité sur un matériau textile observé à des échelles différentes. Ce travail de thèse a été l'occasion de décrire et d'optimiser des systèmes complexes par apprentissage. De même, nous avons réalisé des travaux dans le cadre de la modélisation des relations complexes entre les caractéristiques mesurables des produits et leurs paramètres physiques avec, comme étape préalable, la mise en place de critères de sélection des paramètres pertinents en incluant la connaissance humaine. Cette dernière étape est essentielle pour diminuer la complexité des corrélations entre les entrées et sorties du système, accroître la lisibilité des relations mises en place et garantir une plus grande robustesse du modèle. De plus, lorsque la seule observation spécifique des échantillons au travers de données mesurées, n'est pas suffisante, il devient nécessaire d'introduire une connaissance plus générale sur les produits, comme la connaissance humaine, pour améliorer la qualité des informations introduites dans les modèles complexes. Un des points forts de mon activité de recherche est d'optimiser la qualité des produits et des procédés industriels par intégration de données mesurées et l'expérience humaine.

Mes activités de recherche s'effectuent essentiellement à l'ENSAIT. Une partie de ces travaux est réalisée en collaboration avec les universités des Sciences et Technologies de Lille, l'ENSITM, l'Université d'Etat de Caroline du Nord de l'Université de DongHua en Chine, l'Université IITD⁶ à Dehli en Inde et l'Université de Shinshu au Japon.

Du point de vue de la discipline automatique, beaucoup de problèmes en génie textile peuvent être considérés comme des systèmes complexes qui comprennent une grande quantité de variables d'entrée et de sortie incertaines et imprécises, souvent difficiles à mesurer, et présentant une relation interne fortement non linéaire. A titre d'exemple, dans un procédé textile, la relation entre les paramètres de production et la propriété fonctionnelle espérée sur le produit est assimilable à un système complexe. De la même façon, dans un problème de conception de produits, les critères de conception, les paramètres de production et les besoins des clients définissent un système complexe. Enfin, pour la caractérisation de la qualité textile, la qualité perçue par les clients et la qualité mesurée au sein d'un laboratoire de métrologie textile constituent également un système complexe.

Dans ce cadre, j'ai été amené à développer des méthodes s'appuyant sur les techniques de calcul avancé (théorie du flou, réseaux de neurones, algorithmes génétiques, classification, apprentissage, ...), afin de caractériser le comportement des systèmes complexes directement à partir de données quantitatives et/ou qualitatives résultant de la connaissance humaine (expertise). Cette démarche constitue la base de l'apprentissage automatique. Dans nos travaux de recherche, un modèle se construit en tenant compte des critères suivants : simplicité, flexibilité, fiabilité et capacité d'adaptation et d'interprétation physique.

La plupart des méthodes que nous avons développées dans notre équipe prennent en compte les spécificités du secteur textile, où l'imprécision, l'incertitude et le manque d'information nécessitent des formes de raisonnement adaptées. L'ensemble de mes travaux de recherche se ventile autour des deux thèmes suivants :

- Caractérisation des structures des matériaux textiles et aide à leur conception par exploitation de données mesurées et intégration de la connaissance humaine,
- Evaluation sensorielle des produits textiles par des techniques de calcul avancé.

A la croisée de ces deux approches, on retrouve la description et la modélisation des systèmes complexes par apprentissage avec l'usage de techniques floues. Ces deux thèmes sont rapidement présentés ci-dessous.

⁶ IITD : Indian Institute of Technology, Dehli

1.3 THEMES DE RECHERCHE

1.3.1 Présentation des thèmes

► *Thème 1 : Caractérisation des structures des matériaux textiles et aide à leur conception par exploitation de données mesurées et intégration de la connaissance humaine*

Une approche de modélisation pour des procédés de transformation communément admise consiste à partir des paramètres de fabrication du produit de les mettre en relation avec les propriétés attendues sur ce produit. Volontairement, afin d'obtenir une meilleure compréhension des matériaux textiles et d'obtenir une interprétation plus proche du produit et applicable dans un plus grand nombre d'entreprises indépendamment du procédé employé, nous avons fait le choix de nous pencher directement sur les paramètres précis de leur structure qui influent sur les propriétés espérées. Ceci nous offre en outre la capacité de prévoir quel procédé pourrait être le mieux adapté pour atteindre une propriété particulière. La démarche scientifique générale est représentée à la Figure 1.

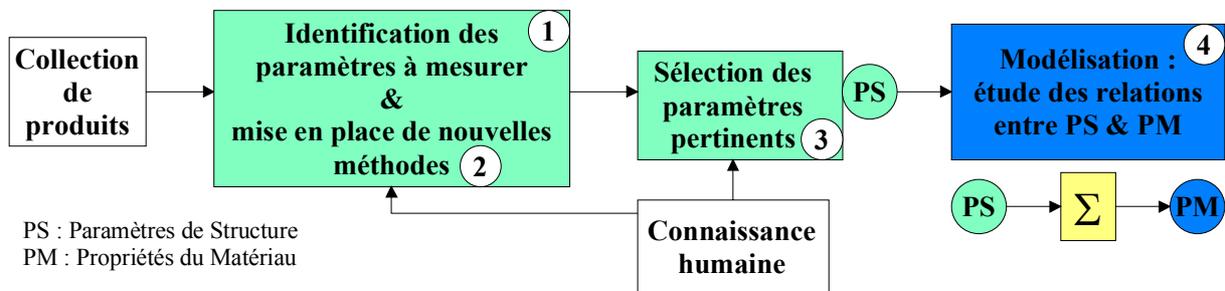


Figure 1 : schéma général de la démarche scientifique du thème 1

Pour les étapes 1 et 2, nous avons mis en œuvre toutes les sources d'information disponibles. Il est en effet très souvent difficile de mobiliser l'outil industriel pour mettre en place des plans d'expérience et fabriquer un grand nombre d'échantillons distincts. C'est la raison pour laquelle nous avons proposé d'ajouter, aux mesures physiques réalisées sur les échantillons, la connaissance humaine sur les produits industriels détenue par les experts des départements de R&D des entreprises. Cette dernière connaissance a aussi permis de dresser la liste exhaustive des paramètres de structure et de participer à l'étape de classement (étape 3) au travers d'un indice calculé des paramètres de structure pertinents à introduire dans le modèle de corrélation pour la propriété considérée (étape 4).

Ce thème poursuit mes travaux engagés dans le cadre de ma thèse. Depuis, trois thèses de doctorat sont en cours [T3]⁷, [T4] et [T5] et trois DEA ont été soutenus [D1]⁸, [D2] et [D6]. Vingt-trois articles ont été publiés dans des revues scientifiques ou présentés dans des congrès internationaux [P1]⁹-[P4], [P10], [P11], [P15], [P16], [C1]¹⁰-[C5], [C7], [C12], [C16], [C20], [C21], [C25], [C27], [C36], [C37], [C39]. Ce thème a fait l'objet d'un séjour de six mois dans un laboratoire américain et fut à la source d'un projet au niveau national.

► *Thème 2 : Evaluation sensorielle des produits textiles par des techniques de calcul avancé*

⁷ [T_i] : désigne la référence aux Thèses

⁸ [D_i] : désigne la référence aux DEA

⁹ [P_i] : désigne la référence aux Publications dans des revues

¹⁰ [C_i] : désigne la référence aux Communications présentées

Face à la concurrence de plus en plus intense au niveau du marché international, l'exploitation des besoins des consommateurs et le développement de nouveaux produits personnalisés avec une réactivité rapide et un coût réduit constituent des stratégies prioritaires pour la plupart des entreprises industrielles (cf. Figure 2). La caractérisation du comportement des consommateurs devient une préoccupation importante qui concerne tous les services de l'entreprise. Dans ce nouveau contexte économique, les évaluations sensorielles et polysensorielles peuvent être utilisées comme un moyen technique permettant d'accomplir ces stratégies liées à la "mass customization" - personnalisation de masse - tout en minimisant le coût de développement et de production. Discipline issue de la pratique de l'entreprise, l'évaluation sensorielle ne constitue pas encore, pour le moment, un système complet au niveau théorique. Cependant, ses applications se sont déjà étendues depuis le secteur agro-alimentaire vers les industries de la cosmétique, pharmaceutique, textile, automobile, chimique, de produits sportifs et de l'emballage.

En qualité de chercheurs en traitement de l'information, nous devons développer de nouvelles méthodes de calcul afin de modéliser et d'analyser les problèmes à partir de données sensorielles. Concrètement, les verrous scientifiques à résoudre en évaluation sensorielle comprennent :

- le développement de plans d'expérience optimaux pour l'acquisition de données sensorielles complètes et fiables,
- les formalisations mathématiques et analyse appropriées de données sensorielles,
- la fusion et la classification de données sensorielles issues de différents évaluateurs afin de fournir des interprétations pertinentes,
- la sélection des paramètres pertinents de l'évaluation sensorielle,
- la modélisation des relations complexes liées à l'évaluation sensorielle.

Afin de résoudre l'incertitude et l'imprécision liées à ces problèmes et pour traiter des informations exprimées humainement au travers du langage, les techniques intelligentes s'avèrent être un outil merveilleusement adapté. Ces techniques comprennent la logique floue, les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques et la classification automatique.

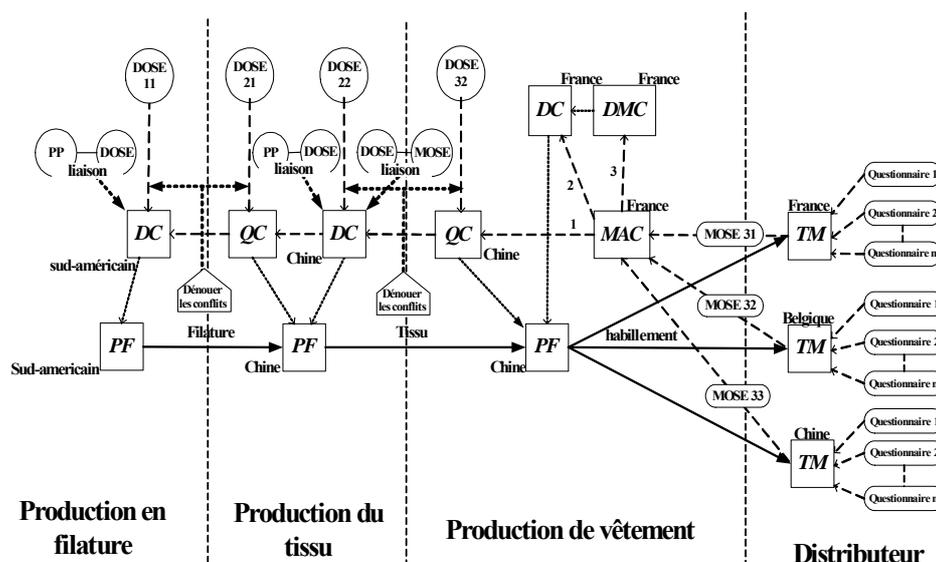


Figure 2 : Plateforme d'évaluation sensorielle adaptée à la chaîne logistique du textile/habillement/distribution (exemple)

Ce thème de recherche concerne deux thèses soutenues [T1]-[T2], une thèse en cours [T6], six DEA [D3]-[D5], [D7]-[D9]. Trente-cinq articles au total ont été publiés ou présentés : [P5]-[P9], [P12]-[P14], [P17]-[P19], [C6], [C8]-[C11], [C13]-[C15], [C17]-[C19], [C22]-[C24], [C26], [C28]-[C35], [C38]. Ce thème a fait en outre l'objet de nombreuses conférences invitées [CI1]¹¹-[CI8], d'un séjour d'un mois au Japon et s'inscrit dans trois projets internationaux et dans un projet national.

1.3.2 Analyse et discussion

L'ensemble des travaux que nous effectuons sur ces deux thèmes est basé sur l'exploitation des données mesurées ou recueillies auprès de panels sur les variables d'entrée et de sortie des systèmes. Chacun de ces thèmes peut être développé séparément. La description des systèmes complexes, comprenant la représentation des variables subjectives, la sélection des variables d'entrée et de sortie et la modélisation des relations entre les variables d'entrée et de sortie, constituent la base de nos travaux. Ce thème permet d'obtenir des modèles approximatifs mais faciles à calculer et à interpréter. L'optimisation par apprentissage a pour objectif d'améliorer leur précision tout en réduisant la complexité de calcul et par la même conséquence en offrant une meilleure interprétation physique. Les modèles proposés visent à établir un compromis entre la précision, la simplicité, la souplesse et l'interprétation physique. Par rapport à la littérature, les contributions nouvelles que nous avons apportées dans nos travaux de recherche depuis 1998 se synthétisent ci-dessous :

- réduction de la complexité du modèle flou de génération des règles de type ABE par décomposition,
- optimisation des fonctions d'appartenance du modèle flou de génération des règles de type ABE,
- estimation de la dimension fractale par les techniques floues,
- définition d'un critère de sensibilité par intégration de la connaissance humaine,
- optimisation de la mise en place de plans d'expérience,
- formalisation de l'évaluation subjective du toucher des étoffes par les techniques floues,
- unification d'informations linguistiques multi granulaires en minimisant la perte d'informations,
- analyse de données sensorielles,
- calcul des dissemblances entre deux distributions de données sensorielles.

La valorisation industrielle comprend :

- la modélisation de la structure géométrique des matériaux poreux (fils, non-tissés, tissus, tricots, ...),
- l'interprétation et la caractérisation de la structure des matériaux textiles,
- la recherche de paramètres de production pertinents pour les propriétés fonctionnelles des matériaux,
- la mise en place et la qualification de panels sensoriels,
- l'analyse de données sensorielles issues de multiples panels (experts, professionnels et de consommateurs),
- la traduction dans les cahiers des charges techniques des évaluations sensorielles,
- l'étude de la corrélation entre les paramètres physiques mesurables et l'évaluation humaine du toucher des étoffes par des panels.

¹¹ [CI_i] : désigne la référence à des Conférences Invitées

La théorie du flou constitue un outil privilégié dans nos travaux de recherche. Elle a été largement appliquée dans les problèmes de modélisation et de représentation de la connaissance humaine. Les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones, la classification automatique et les automates d'apprentissage sont également des outils utilisés. Dans nos projets de recherche, ces outils ont été adaptés pour la résolution de problèmes d'optimisation, de sélection des paramètres pertinents des procédés et d'analyse de données sensorielles. Dans quelques cas particuliers, plusieurs outils peuvent être utilisés conjointement afin d'améliorer la qualité du traitement.

En résumé, mes activités de recherche se sont concrétisées, depuis ma nomination à l'ENSAIT par :

- le co-encadrement de 2 thèses déjà soutenues,
- le co-encadrement de 4 thèses en cours,
- le co-encadrement de 9 DEA,
- la production scientifique de 19 articles (16 publiés, 3 acceptés) dans des revues internationales avec comité de lecture et une quarantaine de communications dans des congrès nationaux et internationaux.

Le détail de la production scientifique est donné dans le paragraphe suivant et compte tenu de ces activités scientifiques, je bénéficie depuis le 1^{er} octobre 2002 de la Prime d'Encadrement Doctoral attribuée par le Ministère chargé de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.

1.3.3 Production Scientifique (58 références)

La production scientifique énoncée ci-dessous montre les efforts apportés pour la publication d'articles, de chapitres ou encore d'un livre dans des revues internationales ou des éditeurs scientifiques. Un accent particulier a été mis sur la participation à des congrès internationaux et nationaux afin de maintenir une connaissance actualisée des travaux réalisés par la communauté scientifique internationale et nouer des contacts pérennes avec d'autres équipes de recherche.

1.3.3.1 PUBLICATIONS DANS DES REVUES (19 REFERENCES)

1998

[P1] L. Koehl, X. Zeng, A. Ghenaim and C. Vasseur, "Extracting geometrical features from a continuous filament yarn by image processing", Journal of the Textile Institute, vol.89, Part I, no.1, 1998, pp.106-116.

[P2] L. Koehl, X. Zeng and C. Vasseur, "A method for optimizing fuzzy membership functions", Studies in Informatics and Control, vol.7, no.2, 1998, pp.143-152.

2001

[P3] X. Zeng, L. Koehl and C. Vasseur, "Design and Implementation of an Estimator of Fractal Dimension using Fuzzy Techniques", Pattern Recognition, 34, 2001, pp. 151-169

2002

[P4] B. Pourdeyhimi and L. Koehl, "Areas Based Strategy For Determining Web Uniformity" Textile Research Journal, Vol. 72(12), Dec. 2002, pp. 1065-1072

2003

[P5] X. Zeng and L. Koehl, "Representation of the Subjective Evaluation of Fabric Hand Using Fuzzy Techniques", *International Journal of Intelligent Systems*, Vol. 18(3), March 2003, pp. 355-363

2004

[P6] X. Zeng, L. Koehl, M. Sahnoun, M-A. Bueno and M. Renner, "Integration of human knowledge and measured data for optimization of fabric hand", *International Journal of General Systems*, vol.33, no.2-3, 2004, pp.243-258.

[P7] X. Zeng, Y. Ding and L. Koehl, "A 2-tuple fuzzy linguistic model for sensory fabric hand evaluation", dans l'ouvrage "Intelligent sensory evaluation", prepared for publication by D.Ruan and X. Zeng, Springer, pp. 217-234

[P8] B. Zhou, X. Zeng, L. Koehl and Y. Ding, "An intelligent technology based method for interpreting sensory evaluation data provided by multiple panels", *Information Sciences*, acceptée en juillet 2004

2005

[P9] L. Koehl, X. Zeng, B. Zhou and Y. Ding, "Sensory Quality Management and Assessment: from Manufacturers to Consumers", in *Intelligent Data Mining Techniques and Applications*, Eds. D.RUAN, G.CHEN, E.KERRE, G.WETS, Springer, Berlin, oct. 2005.

[P10] P. Vroman, L. Koehl, X. Zeng and T. Chen, "Prediction of nonwoven functional properties from their structural parameters using intelligent techniques", *Information Sciences*, acceptée en novembre 2004.

[P11] L. Koehl, T. Chen, P. Vroman and X. Zeng, "Forecasting End-Uses of Nonwovens by integrating Measured Data and Human Expertise", *Research Journal of Textile and Apparel*, Vol. 9, n° 2, May 2005

2006

[P12] X. Zeng, D. Ruan and L. Koehl, "Intelligent Sensory Evaluation: Concepts, Implementations, and Applications", *E-Service Intelligence Book*, Eds.: J. Lu, D. Ruan, G. Zhang, Springer (accepted in January 2006)

[P13] L. Koehl, X. Zeng, B. Zhou and Y. Ding, "Intelligent sensory evaluation of industrial products for exploiting consumers' preference", *Mathematics and Computer in Simulation*, accepted in January 2006

[P14] B. Zhou, X. Zeng, L. Koehl and Y. Ding, "A Web Based Intelligent Sensory Evaluation System of Industrial Products in the Textile Integrated Supply Chain", Chapter in *E-Service Intelligence*, Eds. J.LU, D.RUAN and G.ZHANG, Springer, Berlin, to appear in 2006

[P15] L. Koehl, J. Chraïbi Miou and X. Zeng, "Selecting Relevant Features from Fabric Images for Automated Quality Control of Seam Pucker Using Data Analysis and Human Experts Grading", in *Computational Textile (scientific book)*, Eds. Xianyi Zeng, Yi Li, Ludovic Koehl, and Da Ruan, Springer, Berlin (to appear in dec. 2006)

[P16] X. Zeng, Y. Li, L. Koehl and D. Ruan, *Computational Textile*, (scientific book), Springer, Berlin, to appear in December 2006

[P17] L. Koehl, X. Zeng, B. Zhou and Y. Ding, "Intelligent Sensory Evaluation of Industrial Products for Exploiting Consumer's Preference", special issue "Sensory Evaluation and Intelligent Techniques" of the *International Journal Mathematics and Computers* (acceptée le 6 juillet 2006)

[P18] B. Zhou, X. Zeng, L. Koehl and Y. Ding, "Data Collection and Analysis Methods for Market-Oriented Sensory Evaluation", special issue *Dynamics of Continuous, Discrete & Impulsive Systems, Series B: Applications & Algorithms* (acceptée le 7 juillet 2006)

2007

[P19] Y. Xu, X. Zeng and L. Koehl, "An Intelligent Sensory Evaluation Method for Industrial Products Characterization", International Journal of Information Technology and Decision Making, Vol.6, Issue 2, June 2007 (ref. # ITDM/0207)

1.3.3.2 COMMUNICATIONS DANS DES CONGRES AVEC ACTES (39 REFERENCES)

1996

[C1] X. Zeng, L. Koehl and C. Vasseur, "Estimating fractal dimension of a profile with high accuracy" , CESA'96 IMACS Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications, Lille, France, July 9-12, 1996

1997

[C2] L. Koehl, X. Zeng and C. Vasseur, "A Fuzzy Logic Based Fractal Dimension Estimator For Profiles", 15th IMACS World Congress, August 24-28, 1997, Berlin, Germany

1998

[C3] L. Koehl, X. Zeng and C. Vasseur, "A method of decomposition of fuzzy models using genetic algorithms", CESA'98 IMACS Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications, April 1-4, 1998, Nabeul-Hammamet, Tunisia

[C4] X. Zeng, L. Koehl and C. Vasseur, "Estimating fractal dimension using fuzzy model", FLINS'98 - Third International FLINS Workshop on Fuzzy Logic and Intelligent Technologies for Nuclear Science and Industry, Antwerp, Belgium, September 14-16, 1998

1999

[C5] X. Zeng, L. Koehl and B. Rabenasolo, "Searching for key parameters for controlling a spinning process", CSCC'99 – The 3rd IMACS/IEEE International Multi-Conference: Circuits, systems, Communications and Computers, Athens, Greece, July 4-8, 1999

[C6] X. Zeng et L. Koehl, "Représentation de l'Evaluation Subjective du Toucher des Etoffes par les Techniques Floues", LFA'99 - Rencontres francophones sur la Logique Floue et ses Applications, Valenciennes, 21-22 octobre 1999

2000

[C7] J. Hu, X. Zeng, B. Xin and L. Koehl, "Modeling knit fabric washing process for its control and optimization", WAC'2000 – Fourth World Automation Congress, Maui, Hawaii, USA, June 11-16, 2000

[C8] L. Koehl, X. Zeng and J.Hu, "Modeling relationship between objective and subjective data sets of fabric evaluation", WAC'2000 – Fourth World Automation Congress, Maui, Hawaii, USA, June 11-16, 2000

2001

[C9] X. Zeng and L. Koehl, "Soft computing in textile applications: an overview", TEX-ED&R2001 - 1st AUTEX Conference on Textile Education and Research : Strategies for the New Millennium, Povoá de Varzim, Portugal, June 26-29, 2001

2002

[C10] M. Sahnoun, X. Zeng, L. Koehl, M-A. Bueno, M. Renner, "Modeling the relationship between subjective and objective fabric hand evaluations using fuzzy techniques", IPMU2002 – 9th International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based systems, Annecy, France, July 1st-5, 2002

[C11] X. Zeng, M. Sahnoun, L. Koehl, M-A. Bueno and M. Renner, "Integration of Human Knowledge and Measured Data for Optimization of Fabric Hand", 5th International FLINS Conference on Computational Intelligent Systems for Applied Research 2002, Gent, Belgium, September 16-18, 2002

[C12] P. Vroman, L. Koehl, X. Zeng, "Building a design support system for nonwoven geosynthetics", 7th International Congress on Geosynthetics, Nice, September 22-27th, 2002

[C13] X. Zeng, L. Koehl, M-A. Bueno and M. Renner, "Analyse des Données Sensorielles du Toucher des Etoffes par les Techniques Floues", Conférence Francophone en Logique Floue et ses Applications - LFA2002, Montpellier, 21-22 octobre, 2002

2003

[C14] X. Zeng, L. Koehl, X. Ding and Y. Cui, "Analysis and comparison of French and Chinese sensory panels on fabric hand evaluation by using fuzzy techniques", Int Conf Fuzzy Information Processing Theories and Applications (FIP2003), Beijing, China, 1st-4 March, 2003

[C15] X. Zeng and L. Koehl, "Fabric hand evaluation : subjective and objective methods", 5th International Conference on Textile Science (TEXSCI'03), Liberec, Czech Republic, 16-18 June, 2003

[C16] L. Koehl, P. Vroman, T. Chen, X. Zeng, "Selection of Relevant nonwoven Structural Parameters by Integrating Measured Data and Human Knowledge", Multiconference on computational Engineering in System applications (CESA2003), July 9-11, 2003

[C17] X. Zeng, L. Koehl and Y. Ding, "A 2-Tuple Fuzzy Linguistic Model for Sensory Fabric Hand Evaluation", International Joint Conference on Information Science (JCIS2003), Cary, NC, USA, 26-30 September, 2003

[C18] Y. Ding, X. Zeng, Y. Cui, L. Koehl, C. Hou, R. Yu and F. Sun, "A Web-Based Integrated Intelligent System for Sensory Fabric Hand Evaluation", 2003 Sino-French Workshop on Sensory Evaluation and Intelligent Techniques, SEIT'03, Shanghai, P.R. China, Dec. 17~19, 2003

[C19] L. Koehl, Y. Ding and X. Zeng, "Sensory Evaluation in Characterization of Fabric Hand", 2003 Sino-French Workshop on Sensory Evaluation and Intelligent Techniques, SEIT'03, Shanghai, P.R. China, Dec. 17~19, 2003

2004

[C20] T. Chen, L. Koehl, P. Vroman and X. Zeng, "Modeling the relationship between the structural parameters and properties of nonwovens by using soft computing techniques", Proceedings of the Textile Institute 83rd World Conference (83rd TIWC), Shanghai, P.R. China, May 23-27, 2004

[C21] L. Koehl, P. Vroman, T. Chen, X. Zeng, "Forecasting Nonwoven Expected End-Uses by Integrating Measured Data and Human Expertise", AUTEX Conference on Textile Education and Research, Roubaix, France, June 22-25, 2004

[C22] B. Zhou, X. Zeng, L. Koehl and Y. Ding, "A two level model for description of fabric hand sensory evaluation", AUTEX Conference on Textile Education and Research, Roubaix, France, June 22-25, 2004 (ISBN 2-9522440-0-6).

[C23] B. Zhou, X. Zeng, L. Koehl and Y. Ding, "A fuzzy logic based method for analyzing sensory evaluation data", International Conference on Intelligent Systems (IS2004), Varna, Bulgaria, June 22-24, 2004

[C24] Y. Xu, X. Zeng, Z. Wu and L. Koehl, "A method for sensory evaluation based on satisfaction degrees", International Conference on Service Systems and Service Management (SSSM04), Beijing, China, July 19-21, 2004

[C25] P. Vroman, L. Koehl, X. Zeng and T. Chen, "Modeling the relationship between nonwoven structural parameters and their properties from few number of data", FLINS2004, Blankenberghe, Belgium, September 1-3, 2004

[C26] L. Koehl, X. Zeng, B. Zhou, "Contribution à l'Analyse et l'Interprétation de Données Sensorielles Issues de Multiples Panels", Congrès C2EI : Modélisation et pilotage des systèmes de Connaissances et de Compétences dans les Entreprises Industrielles, Nancy, France, 1er et 2 Décembre 2004

2005

[C27] J. Chraïbi Miou, L. Koehl, X. Zeng and D. Deguillemont, "Selecting Relevant Features from Fabric Images for Automated Quality Control of Seam Pucker Using Data Analysis and Human Experts Grading", 17th IMACS'05 World Congress, Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation, July 11 - 15, 2005, Paris, France

[C28] L. Koehl, X. Zeng, B. Zhou and Y. Ding, "Intelligent Sensory Evaluation of Industrial Products for Exploiting Consumer's Preference", 17th IMACS'05 World Congress, Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation, July 11 - 15, 2005, Paris, France

[C29] X. Liu, X. Zeng, Y. Xu and L. Koehl, "A Model of Customer Satisfaction Index in E-commerce", 17th IMACS'05 World Congress, Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation, July 11 - 15, 2005, Paris, France

[C30] X. Liu, X. Zeng, Y. Xu and L. Koehl, "A Model of Customer Satisfaction Index in E-commerce", 17th IMACS'05 World Congress, Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation, July 11 - 15, 2005, Paris, France

[C31] B. Zhou, L. Koehl, X. Zeng and Y. Ding, "A 2-level Intelligent Sensory Evaluation System of Industrial Products in an Integrated Supply Chain", 8th Joint Conference on Information Sciences (JCIS'05), July 21 - 26, 2005, Salt Lake City, Utah

[C32] X. Liu, X. Zeng, Y. Xu and L. Koehl, "A study of reasoning rules of expert system of enterprise human resource competence appraisal based on fuzzy relation", 8th Joint Conference on Information Sciences (JCIS), July 21 - 26, 2005, Salt Lake City, Utah

2006

[C33] B. Zhou, X. Zeng, L. Koehl and Y. Ding, "Data Collection and Analysis Methods for Market-Oriented Sensory Evaluation", International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE'06), April 6-7, 2006, Shanghai, China

[C34] X. Liu, X. Zeng, L. Koehl, "A method for reducing linguistic terms in sensory evaluation using principle of rough set theory", 7th International FLINS Conference on Applied Artificial Intelligence (FLINS 2006), August 29-31, 2006, Genova, Italy

[C35] L. Koehl, X. Zeng, B. Zhou and YS. Ding, "Subjective and Objective Evaluations on Fabric Hand: from Manufacturers to Consumers", INTC'06 Conference, Houston, Texas, USA Sept. 25-28, 2006

[C36] X. Deng, P. Vroman, X. Zeng and L. Koehl, "A fuzzy logic based criterion for selecting relevant process parameters", Multiconference on "Computational Engineering in Systems Applications" CESA'06, October 4-6, 2006, Beijing, China (ref.#T1-I-44-0545)

[C37] L. Koehl, X. Zeng and L. Li, "Digital Image Analysis to Determine Pore Size Distribution of Nonwoven Fabrics", Multiconference on "Computational Engineering in Systems Applications" CESA'06, October 4-6, 2006, Beijing, China (ref.# T1-I-44-0244)

[C38] X. liu, X. Zeng, L. Koehl and Y. Xu, "A Method of Experiment Designs based on IOWA Operator Inference in Sensory Evaluation", Multiconference on "Computational Engineering in Systems Applications" CESA'06, October 4-6, 2006, Beijing, China (ref.#T1-I-44-0383)

[C39] M. Dimassi, L. Koehl and X. Zeng, "Modeling of the pore-network by Image Processing: Application to the non-woven material", Multiconference on "Computational Engineering in Systems Applications" CESA'06, October 4-6, 2006, Beijing, China (ref.#T1-I-44-0502)

1.3.3.3 CONFERENCES INVITEES (7 REFERENCES)

[CI1] L. Koehl et X. Zeng, "Comment caractériser le toucher des produits textiles ?", Journée technologique Euroforum sur le toucher des étoffes, Paris, France, 4 et 5 décembre 2002

[CI2] L. Koehl et X. Zeng, "Apport des techniques de logique floue à l'analyse sensorielle", VIème Journée Analyse Sensorielle de l'Ecole de Biologie Industrielle (EBI), Cergy-Pontoise(95), France, 13 mars 2003

[CI3] X. Zeng et L. Koehl, "Modélisation du toucher textile", Journée ECRIN "Tribologie", Lyon, octobre 2003

[CI4] L. Koehl et X. Zeng, "Détermination objective de la qualité des produits textiles", Rencontre Marketing Sensoriel – Programme de veille scientifique Human Engineering EUROSYN, Paris, France, 16 octobre 2003

[CI5] L. Koehl et X. Zeng, "Développer en un temps record, un produit répondant à un cahier des charges tactile", Future by Tissu Premier, Roubaix, 12 mai 2004.

[CI6] X. Zeng et L. Koehl, "Modeling and optimization of textile production by learning from measured data and human knowledge", Ecole d'Eté du projet européen ITSAPT (5ème PCRD), Université Technique de Liberec, République Tchèque, juin 2004.

[CI7] L. Koehl et X. Zeng, "Mesurer physiquement le toucher et sélectionner les mesures pertinentes", Projet RESIST : Journée Evaluation Sensorielle des Matériaux Textiles, Université de Gand, Belgique, 9 décembre 2004.

[CI8] L. Koehl et X. Zeng, "How to assess sensory evaluation of textile products from manufacturers to consumers", Séance de consultation auprès de l'entreprise Procter&Gamble, Cincinnati, Ohio, USA, Sept. 29, 2006.

1.3.4 Encadrement de recherche (15 références)

1.3.4.1 CODIRECTIONS DE THESES DE DOCTORAT (6 REFERENCES)

► Thèses soutenues (2 références)

[T1] Medhi SAHNOUN

"Nouvelle technique pour la caractérisation de l'état de surface des textiles techniques"

Université de Haute Alsace, soutenue le 18 décembre 2002 avec mention très honorable

Pourcentage d'encadrement : 50%

Codirection : Marc RENNERT (Université de Haute Alsace), Xianyi Zeng

Valorisation scientifique : [P6] [C10] [C11] [C13]

[T2] Bin ZHOU

"Analyse des évaluations sensorielles des produits industriels par des techniques de calculs avancées en vue de la caractérisation des comportements de consommateurs"

Université des Sciences et Technologies de Lille-I, soutenue le 12 juin 2006 avec mention très honorable

Pourcentage d'encadrement : 50%

Codirection : Xianyi Zeng

Valorisation scientifique : [P8] [P9] [P13] [P14] [P17] [P18] [C22] [C23] [C26] [C28] [C31] [C33] [C35]

► Thèses en cours (4 références)

[T3] Jawad CHRAIBI MIOU

"Détermination objective de la qualité des textiles par l'imagerie 3D"

Université des Sciences et Technologies de Lille, soutenance prévue en décembre 2006

Pourcentage d'encadrement : 50%

Codirection : Xianyi Zeng

Valorisation scientifique : [P15][C27]

[T4] Xiaoguang DENG

"Développement d'un système de diagnostic de défauts pour une ligne de fabrication de non-tissé par apprentissage de données mesurées et de la connaissance humaine "

Université de Haute Alsace, soutenance prévue en septembre 2007

Pourcentage d'encadrement : 40%

Codirection : Xianyi Zeng et Philippe Vroman

Valorisation scientifique : [C36]

[T5] Mohamed DIMASSI

"Modélisation de la structure poreuse des matériaux textiles par des techniques de calcul avancé"

Université des Sciences et Technologies de Lille, soutenance prévue en septembre 2008

Pourcentage d'encadrement : 50%

Codirection : Xianyi Zeng

Valorisation scientifique : [C39]

[T6] Emilie BERTAUX

"Etude de la relation entre le confort textile des vêtements sportifs et les paramètres des composants textiles"

Université des Sciences et Technologies de Lille, soutenance prévue en décembre 2008

Pourcentage d'encadrement : 50%

Codirection : Xianyi Zeng

1.3.4.2 ENCADREMENTS DE DEA (9 REFERENCES)

[D1] Jérôme ROSSET

"Développement d'une méthode pour la conduite automatique des procédés de filage et de polycondensation"

Université des Sciences et Technologies de Lille, juin 1998

[D2] Merien GZARA

"Sélection des paramètres pertinents du procédé de filage par classification automatique"

Université des Sciences et Technologies de Lille, septembre 1998

[D3] Inâam BEN KHALED

"Etude des corrélations entre la perception tactile d'une étoffe et les paramètres physiques et physico-chimiques"

Université des Sciences et Technologies de Lille, juillet 2001

[D4] Mariem BELHAJ

"Modélisation de la relation entre les variables objectives caractérisant la texture de l'étoffe et sa qualité en matière de toucher"

Université des Sciences et Technologies de Lille, juillet 2002

[D5] Marianne POBELLE

"Evaluation de la qualité des bas de contention THUASNE : Méthodes objectives et subjectives"

Université des Sciences et Technologies de Lille, juillet 2003

Situation actuelle de la diplômée : responsable qualité à la société AUTOLIV

[D6] Mohamed DIMASSI

"Optimisation de Mesures par Profilomètre Optique par les Techniques de Calcul Avancé"

Université des Sciences et Technologies de Lille, septembre 2004

[D7] Sofiane ABDALLAH

"Etude de la relation entre l'évaluation subjective et l'évaluation objective de toucher textile"

Université des Sciences et Technologies de Lille, septembre 2005

[D8] Ning GUO

"Influence des adoucissants sur la performance sensorielle de tissus apprêtés"

Septembre 2006

Ecole Doctorale ENSAM Paris, mention Mécanique, Matériaux et Procédés.

[D9] Yijun ZHU

"Développement d'un système informatique d'aide à l'évaluation sensorielle des produits textiles en utilisant le langage JAVA"

Université des Sciences et Technologies de Lille, Septembre 2006

en co-encadrement avec l'équipe de Mme B. Bouchon-Meunier du LIP6, Pôle IA à Paris-Jussieu VI

Le taux d'encadrement de ces DEA est de 50% partagé avec mes collègues du GEMTEX.

1.4 RAYONNEMENT SCIENTIFIQUE

1.4.1 Activité de relecture

Depuis 2001, j'interviens en qualité de rapporteur pour les publications soumises dans les revues scientifiques internationales 'Textile Research Journal', 'Information Science', 'International Journal of Intelligent Systems' ou encore pour l'éditeur scientifique Springer. Je réalise une activité de relecture de 3 publications par an en moyenne.

J'interviens également dans la relecture des articles soumis aux congrès "Computational Engineering in Systems Applications" (CESA), "Fuzzy Information Processing - Theories and Applications" (FIP), "Sensory Evaluation and Intelligent Techniques" (SEIT) et "Joint Conference on Information Sciences" (JCIS).

1.4.2 Rayonnement national et international

Dans le cadre du Plan Régional Textile-Habillement (PRTH) du Nord-Pas-de-Calais (2000-2003), j'ai participé à la définition des thèmes de recherche prioritaires et j'ai été nommé responsable de l'ENSAIT pour le thème "Analyse de la structure des matériaux non-tissés" et ai participé activement au projet PRTH "Analyse sensorielle". Pour le premier projet, l'ensemble de mes compétences acquises depuis mon DEA ont été mises en œuvre pour étudier les propriétés des matériaux textiles non-tissés, volet de recherche pour lequel j'ai été le porteur sous la Direction scientifique de M. Xianyi Zeng. C'est au travers de ce projet que se sont exprimées les compétences préalablement acquises au cours de mes premiers travaux en DEA et en thèse. Le projet s'intitulait "Etude des corrélations entre les propriétés des non-tissés et les paramètres structuraux par des techniques de calcul avancé". Ce projet avait pour objectif d'étudier l'influence des paramètres de structure d'un non-tissé destiné à la filtration sur ses propriétés fonctionnelles (dynamométriques, hydrauliques, etc.), et d'en extraire un modèle de corrélation par des techniques de calcul avancé et l'intégration de connaissances humaines pour compléter les sources d'information. Un tel modèle doit permettre d'optimiser les paramètres de structure d'un non-tissé en fonction des propriétés recherchées sur le produit. Cette étude permet également à terme une meilleure connaissance du comportement des non-tissés et une optimisation des paramètres de fabrication. Les industriels peuvent alors envisager une diminution des temps et des coûts de recherche et de développement des nouveaux produits non-tissés. Le Laboratoire de recherche américain NCRC de l'Université d'Etat de Caroline du Nord aux USA a développé de larges compétences dans le domaine de l'analyse d'images pour l'observation des matériaux textiles techniques. C'est au travers de la littérature et à l'occasion d'une conférence internationale que nous avons eu l'occasion de sentir le fructueux intérêt de mettre en commun nos compétences acquises appliquées aux textiles à usage technique. En particulier, la collaboration entre nos deux instituts sur le développement du contrôle automatique en ligne du procédé de fabrication des non-tissés par le biais de l'analyse d'images et de techniques avancées offre en outre l'échange des connaissances expertes et des différentes techniques mises au point par les partenaires. Par conséquent, j'ai décidé de passer un semestre en qualité de Professeur invité (de février à juillet 2001) au sein du laboratoire de recherche NCRC sous la Direction de Professeur Behnam Pourdeyhimi. Ce séjour a conduit à la publication en commun entre les deux instituts [P4], GE.M.TEX et NCRC et au dépôt d'une demande de brevet (NCSU Invention Disclosure N° 06-071 titled, "Profile based on-line uniformity measurement system for nonwovens, paper and other fibrous material" - December 6, 2005 – inventors: Ludovic Koehl and Behnam Pourdeyhimi).

PRA 2001-2003 (Programme de Recherche Avancée Franco-Chinois) financé conjointement par les gouvernements français et chinois et déposé par Professeur X. Zeng est un projet ayant trait à l'analyse sensorielle de la qualité des produits textiles par des techniques de calcul avancé en vue de la caractérisation des comportements de consommateurs. J'ai participé à ce programme au travers du co-encadrement de deux Professeurs invités pour une période d'un an, à savoir Professeurs Y. Xu (en 2004) et X. Liu (en 2005). La valorisation des travaux de recherche s'est faite sous forme de publications dans des revues et des congrès : [P19], [C24], [C29], [C30], [C32], [C34] et [C38].

Je participe aux côtés du Coordinateur, Professeur Xianyi Zeng, au projet européen Asia-Link (sept. 2004 à sept. 2007). Ce projet est financé par l'Union Européenne et s'intitule 'Development of a textile/apparel oriented research co-operation network between Europe and Asia by exchanging young teachers and postgraduate students'. Il implique deux universités européennes Universidade do Minho au Portugal et l'ENSAIT, université porteuse du projet, une université chinoise à Donghua et l'université indienne Indian Institute of Technology à Dehli (IITD). J'ai dirigé les réunions de mise en place des projets des étudiants au niveau Master au sein d'IITD et co-encadre les travaux des étudiants et professeurs invités à l'ENSAIT dans le cadre du projet. Le co-encadrement de Professeur Liqing Li pour un semestre a conduit à une valorisation dans un congrès [C37]. A partir de la rentrée universitaire 2006/2007, nous nous apprêtons à recevoir un doctorant indien pour une durée de neuf mois qui s'intéressera à l'axe de recherche concernant la structure des matériaux textiles techniques et en particulier sur la construction dynamique des réseaux de connections inter-porales sous l'influence d'un liquide.

Enfin, depuis quatre ans, j'ai été sollicité pour organiser et présider des sessions techniques sur l'application de l'automatique dans l'industrie textile, dans les congrès suivants :

- Président de session 'Decision Making' au Congrès Int Conf Fuzzy Information Processing Theories and Applications (FIP2003), Beijing, China, 1st-4 March, 2003,
- Président de session 'Sensory Evaluation Applications' du Congrès Sino-French Workshop on Sensory Evaluation and Intelligent Techniques SEIT'03, Shanghai, P.R. China, Dec. 17~19, 2003
- Membre-Organisateur du Congrès SEIT (Sino-French Workshop on Sensory Evaluation and Intelligent Techniques) : SEIT'2003(Beijing, P.R. China) and SEIT'2005 (Paris, France)
- Membre co-organisateur de la session 'Technical Session on Scientific Computation in Textile Applications' du congrès IMACS'2005, July 11-15, 2005, Paris, France
- Président de session et co-organisateur de la session 'Scientific computation in textile application' au Congrès IMACS'05, July 11 - 15, 2005, Paris, France
- Membre du Comité International et Président de session 'E-Service Intelligence' au Congrès 8th Joint Conference on Information Sciences (JCIS), July 21 - 26, 2005, Salt Lake City, Utah
- Membre du Comité International du Congrès CESA'2006, Oct. 4-6,2006, Beijing, China et co-organisateur de la session 'Computational Textiles'

Ces sessions, qui rassemblent un nombre important de chercheurs du secteur textile et des communautés automatique et informatique travaillant sur les applications textiles, permettent une communication transversale sur des thèmes communs : modélisation, simulation et analyse de données pour les procédés textiles : analyse de la morphologie des matériaux textiles, le contrôle qualité des produits textiles, l'aide à la conception et l'analyse de données sensorielles.

1.5 ACTIVITES ADMINISTRATIVES ET D'INTERETS COLLECTIFS

Mes activités administratives et d'intérêts collectifs recouvrent trois aspects :

- relations internationales pour l'enseignement,
- coordination de la recherche,
- coopérations industrielles et valorisation.

1.5.1 Relations internationales

➤ **Projet TTN Europe/Etats-Unis d'Amérique du Nord**

Le projet Transatlantic Textile Network (TTN P116J 0 0 0 5 3 Novembre 2000 à Novembre 2003) : ce projet européen TTN financé aux Etats-Unis par le F.I.P.S.E regroupe six universités actives dans le domaine des textiles. Trois sont européennes (ENSAIT à Roubaix, France (European lead institution), RWTH Aachen en Allemagne, et l'UPC à Barcelone en Espagne. Les trois partenaires américains sont NC State à Raleigh, NC (US lead institution), Philadelphia University en PA, et UMass à Dartmouth, MA. L'objet du projet est triple. Notre souhait est de faciliter à la fois les échanges académiques d'étudiants des deux côtés de l'Atlantique et de les inciter à participer à des projets à distance. Troisièmement, nous encourageons les stages en entreprise pour les étudiants. Le projet était piloté par le Service des Relations Internationales de l'ENSAIT sous la Direction de Mme Audrey Stewart. Dans le cadre de ce projet, j'ai supervisé et encadré tous les échanges physiques et virtuels des étudiants de l'ENSAIT entre les trois partenaires américains et nous. Par réciprocité, nous avons reçu des étudiants américains à l'ENSAIT, j'ai mis en place le site internet du projet et des échanges virtuels et participé à toutes les réunions de suivi. Depuis le démarrage du projet, j'assume une part de responsabilité dans les relations de l'ENSAIT avec le continent Nord-Américain. Cette mission concerne la définition du programme d'enseignement pour nos étudiants envoyés, pour les semestres intégrés et le suivi de ces étudiants durant leur séjour à l'étranger.

➤ **Projet DUO-France/Japon**

De 2005 à 2007, en qualité de coordinateur au niveau de l'ENSAIT, j'ai obtenu le financement d'un programme Duo-France/Japon entre notre Ecole et l'Université de Shinshu au Japon financé par le Ministère des Affaires Etrangères (EGIDE). L'objectif principal du programme Duo-France est de mettre en place une stratégie de double diplôme. Des étudiants régulièrement inscrits dans chacun des instituts peuvent, selon leur souhait, prétendre à rejoindre ce partenariat et acquérir à la fois le diplôme d'Ingénieur textile de l'ENSAIT (équivalent à un diplôme de Master Sciences) et le diplôme de Master de l'Université de Shinshu moyennant l'ajout d'un semestre complémentaire. Ceci offre aux étudiants une reconnaissance dans les deux pays et des opportunités accrues de travailler dans des entreprises du pays d'accueil ou encore des entreprises à la jonction entre la France et le Japon. Dans un premier temps, de nombreux échanges ont eu lieu pour comprendre les points communs et les différences entre les parcours d'obtention du Master pour les deux pays. En effet, au Japon, le mode de recrutement est distinct du système français et le parcours est plus long d'un an. Ce n'est que par une compréhension profonde des enseignements dispensés de part et d'autre et des conditions d'entrée dans les universités respectives que nous avons pu parvenir à convenir d'une durée et l'assurance d'obtenir un niveau Master équivalent pour l'obtention du Double Diplôme. L'opportunité de mettre en place un Double Diplôme entre l'ENSAIT et l'université de Shinshu a reçu un accueil très favorable de la part de Professeur Toshihiro Hirai, Président de l'Université de Shinshu secondé par Professeur Sukeyuki Kumei, Directeur des Relations Internationales à Shinshu et devrait être signé pour la rentrée universitaire 2006/2007. L'annexe à ce rapport présente le fruit des négociations qui se sont tenues pour la mise en place du Double Diplôme. Actuellement, deux Elèves-Ingénieurs de l'ENSAIT effectuent un semestre au Japon. David Mélange réalise son Projet d'Innovation Industrielle au sein de l'entreprise japonaise TOYOBO à Osaka. Il travaille sur la caractérisation de matériaux textiles techniques en structure non-tissés et j'ai eu l'occasion de le rencontrer et d'échanger sur son sujet. M. Arnaud Bigorgne participe à un échange de mobilité Duo. Il est co-encadré par mes soins et ceux de Professeur Yoshio Shimizu. Il

travaille sur un projet en analyse de données sensorielles qui s'inscrit dans une thématique de notre recherche (thème 2). J'ai profité de mon séjour d'un mois à l'université de Shinshu en avril 2006 pour, non seulement échanger avec mes Collègues sur cette thématique, encadrer Arnaud Bigorgne, mais aussi me renseigner sur les autres axes de recherche de l'Université de Shinshu. L'idée était d'identifier les thématiques communes avec le laboratoire de recherche GE.M.TEX pour profiter d'un partenariat fort au niveau académique pour faciliter des échanges entre des équipes de recherche. Nous espérons un flux bilatéral d'étudiants dans les deux sens de l'ordre de un à deux par an.

➤ **Projet de co-tutelle de thèse France/Tunisie**

J'ai profité des excellentes relations tissées au cours de mon service civil pour mettre en place récemment un dossier de co-tutelle de thèse entre l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir (ENIM) en Tunisie, l'ENSAIT et l'Université des Sciences et Technologies de Lille-I (USTL). Cette convention co-signée par les trois partenaires, à savoir Eric Devaux en qualité d'Administrateur provisoire de l'ENSAIT, Mohammed El Baker Rammah, Président de l'Université de Monastir et M. Baussart, Président de Lille-I et datée du 2 juin 2005 fait suite à une convention entre l'ENIM et l'ENSAIT qui a été ré-actualisée courant 2004 (la précédente datait de 1998 pour une durée de 5 ans). Elle statue sur nos mobilités Enseignants et étudiants ainsi que sur les conditions de nos échanges pour les années à venir. Ces conventions doivent nous permettre d'accueillir et co-encadrer en thèse des étudiants au sein du laboratoire GE.M.TEX.

1.5.2 Coordination de la recherche

Depuis le 29 mars 2004, je suis membre titulaire de la Commission des Spécialistes de l'ENSAIT. En interne, au sein de notre laboratoire, j'ai organisé périodiquement des séminaires permettant aux thésards et aux chercheurs invités de communiquer régulièrement sur leurs sujets de recherche avec les membres permanents.

En ce qui concerne mes activités d'animateur scientifique sur le plan régional, je suis impliqué dans les travaux du Groupement de Recherche en Automatisation Intégrée et Systèmes Hommes/Machines (GRAISyHM). Je m'engage essentiellement dans les deux thèmes du GRAISyHM intitulés : "*Signal et image*" et "*Commande et pilotage*". J'ai eu l'occasion de présenter des conférences à la Communauté automatique des travaux concernant les deux thèmes "*structure des matériaux*" et "*évaluation sensorielle*". Dans ce cadre, j'ai procédé le 30 juin 2006 au dépôt d'un dossier de candidature en réponse à la campagne 2007/2008 d'appel d'offres du GRAISyHM intitulé "*Extraction d'informations sémantiques pertinentes à partir d'un système complexe*". Ce projet coordonnant les efforts de quatre laboratoires, à savoir le GEMTEX à Roubaix, le LAMIH de Valenciennes, le Laboratoire Department of Applied Mathematics and Computer Science de l'Université de Grand en Belgique et l'ERPI (Equipe de Recherche sur les Processus Innovatifs) de l'ENSGSI à Nancy répond en tout point à l'une des perspectives que nous souhaitons mettre en œuvre dans le cadre du thème 2 de ce mémoire.

1.5.3 Coopérations industrielles et valorisation

De nombreuses collaborations industrielles ont été établies à travers mes activités de recherche, notamment par les contrats dont la liste suit.

Partie I : Introduction générale

Contrat d'études avec la société THUASNE à St-Etienne(42) sur l'"Evaluation de la qualité des bas de contention THUASNE : Méthodes objectives et subjectives", DEA [D5] de Melle Marianne Pobelle, 6 mois (2003). Ces Travaux ont fait l'objet de la remise d'un prix par la société industrielle du Nord. A l'issu de ce projet, l'étudiante a été embauchée directement par l'équipementier automobile Autoliv dans le domaine de la mesure de la qualité perçue des produits textiles.

Contrat d'études avec la société DIM à Autun(71) sur l'"Etude des variations dimensionnelles d'un collant à tous les stades de sa fabrication", projet de fin d'études de M. Olivier Daras, 6 mois (2002).

Contrat d'études avec la société FILIX SA à Condé sur Noireau(14) sur le "Calcul de la composition théorique d'un fil lastex", projet de fin d'études de M. Yunhao Gong, 6 mois (2004). A l'issu de ce projet, l'étudiant a été embauché par l'entreprise FILIX représentée en Chine.

Contrat d'études avec la société WELL au Vigan(30) sur la "Mise en place et qualification d'un panel interne en relation avec la performance tactile de bas/mi-bas", projet de fin d'études de M. Nicolas Dumont, 6 mois (2004).

Contrat avec la société DIM à Autun(71) sur la "Mesure objective de la qualité 'Cotton Touch' d'une gamme d'échantillon de collants DIM" étude rendue en octobre 2004 (durée de trois mois).

Contrat avec la société Bourjois/Chanel à Paris(75) sur les "Corrélations panel interne sensoriel et tests consommateurs", étude rendue en novembre 2004 (durée de trois mois).

Contrat avec la société GTI/Sodifac à Roubaix(59) en juillet 2005 sur la "Mise en place et qualification d'un panel interne pour la caractérisation de housses de sièges automobile" - ce contrat a conduit au dépôt d'une marque senso-touch®

Contrat avec la société Unilever en février 2006, à Manchester, UK, sur la "Caractérisation sensorielle objective et subjective d'agents adoucissants"

Contrat avec la société Bellier à Calais(62) en février 2006, sur la "Détermination de la sensation tactile des consommatrices sur des dentelles en évaluation sensorielle"

Convention CIFRE avec l'entreprise DECATHLON à Villeneuve d'Ascq(59) pour la thèse de Melle Emilie BERTAUX [T6]

En date du 29 et 30 septembre 2006, j'ai été convié pour une séance de consultation auprès de l'entreprise américaine Procter&Gamble (P&G) à Cincinnati, Ohio, USA pour présenter l'ensemble de nos résultats de recherche à la croisée des travaux concernant les thèmes 1 et 2. L'entreprise connaît une attente pressente de la part de ses consommateurs en terme d'évaluation du confort pour l'ensemble de sa gamme de produits qui couvre les agents adoucissants, les produits lessiviels et les matériaux (en particulier les matériaux textiles techniques comme les non-tissés : hygiène domestique, bébés et adultes). Ils souhaitent, avec l'aide de notre équipe, quantifier la qualité perçue par leurs clients et optimiser les structures

des matériaux textiles et les formulations. C'est par leur service de veille et au travers de la lecture de nos travaux publiés que l'entreprise s'est rapprochée de notre équipe [CI8].

Actuellement, nous avons reçu l'accord formel pour un nouveau contrat avec l'entreprise UNILEVER, Manchester, UK pour le démarrage de la thèse de Melle Ning GUO en septembre 2006 à la suite de ses travaux de DEA [D8].

Mon poste étant rattaché à une Grande Ecole d'Ingénieurs avec deux filières de formation, initiale et par apprentissage, l'encadrement des stages, des projets et des apprentis ingénieurs sont autant d'occasions de travailler en étroite collaboration avec des industriels. Un accent fort est donné sur la formation par le biais de stages et de projets en entreprise. L'accueil d'Elèves-Ingénieurs durant leur parcours universitaire au sein de l'entreprise aide particulièrement les jeunes à être confrontés aux réelles problématiques industrielles, à mettre en œuvre le savoir qu'il leur a été dispensé à l'ENSAIT et à mesurer l'importance des relations humaines. Ces contrats de valorisation ont conduit à des rémunérations qui sont autant de fonds pour financer une partie de nos travaux de recherche et leur valorisation.

1.6 CONCLUSION

Depuis ma nomination à l'ENSAIT en 1998, j'ai essayé de maintenir un équilibre entre mes activités pédagogiques, de recherche et administratives. D'un point de vue pédagogique, ces activités, qui ont débuté par la mise en place de cours en 1994, ont toujours eu à cœur de former les étudiants par la recherche en assurant le transfert des connaissances dans le cadre de leur projet d'innovation en entreprise ainsi que de favoriser leur mobilité durant leur formation. Les collaborations les plus fructueuses au niveau universitaire sont souvent celles qui combinent à la fois les intérêts scientifiques avec les intérêts pédagogiques et c'est dans ce sens que je me suis fortement impliqué dans la politique de mon établissement. Par ailleurs, l'encadrement de projets des étudiants en liaison avec des entreprises industrielles textiles me permet de me confronter directement aux attentes des entreprises ce qui ouvre de nouvelles pistes de recherche et les rend plus pertinentes.

Parmi ces activités variées, la recherche scientifique et sa valorisation occupent une place très importante. L'ensemble de mes travaux de recherche s'articulent autour d'un axe principal : l'aide à la conception personnalisée de produits textiles par le biais d'analyse de données issues à la fois de mesures physiques mais aussi intégrant une autre source comme celle de la connaissance humaine. Selon cet axe, j'exploite les différentes approches de l'automatique (modélisation, optimisation, ...) et de l'intelligence artificielle. Ces travaux de recherche sont présentés de façon détaillée dans la seconde partie.

Pour chacun des deux thèmes qui se dégagent dans mes travaux universitaires, j'ai veillé à les réaliser en partenariat avec des équipes de recherche en France et à l'étranger tout en les ancrant profondément dans l'industrie. Ceci m'offre un cadre plus large et surtout me permet de confronter et d'enrichir mes connaissances.

PARTIE II

PRESENTATION DES THEMES DE RECHERCHE

2 PRESENTATION DES THEMES DE RECHERCHE

2.1 INTRODUCTION

Mes activités de Recherche ont débuté lors de la dernière année d'Ecole d'Ingénieurs dans le cadre du D.E.A sur un sujet portant sur la modélisation de la capillarité au sein des fibres textiles. Ce travail s'est poursuivi lors du service militaire en qualité de coopérant du service national à l'E.N.I.M et a abouti à la thèse soutenue le 5 janvier 1998. Le thème 1, qui regroupe mes travaux de recherche ayant trait à la caractérisation des structures des matériaux textiles et aide à leur conception par exploitation de données mesurées et intégration de la connaissance humaine, trouvent leur origine dans mes études doctorales qui ont menés à ma qualification et à l'accession à mon poste de Maître de Conférences à l'ENSAIT. Peu de temps après ma prise de fonction, notre équipe, à l'écoute des attentes des industriels, a souhaité valoriser ses compétences en automatique et en génie textile pour proposer une collection de méthodes adaptées à l'évaluation sensorielle du toucher des matériaux textiles. Ces travaux ont démarré en 2000 et se sont naturellement appuyés sur nos premiers résultats issus du premier thème notamment sur l'intégration de données recueillies auprès des experts, mais aussi sur la construction et l'optimisation de modèles flous. Une nouvelle fois, les techniques mises en jeu concernaient l'analyse de données et la construction de modèles avec toutefois une nouvelle dimension : les données n'étaient plus majoritairement le résultat de mesures par des capteurs physiques ou des techniques automatiques d'extraction de paramètres pertinents sur les matériaux, comme pour le premier thème, mais elles sont désormais issues directement de l'expression humaine ressentie au contact du matériau. C'était une nouvelle manière d'observer et d'intégrer de l'information humaine. La catégorisation générique des problèmes d'évaluation sensorielle introduit trois niveaux dans les jeux de données : les données subjectives issues de consommateurs, les données subjectives-objectivées issues de panels professionnels et les données objectives issues de capteurs physiques. Ce sont les modèles du type données subjectives-mesures objectives qui sont la toison d'or des industriels, car dans un tel cas de figure, ils peuvent faire l'économie de panels professionnels. Ce second thème de recherche sera développé dans la section 2.3. Aujourd'hui, nos travaux et leur valorisation auprès de groupes industriels se situent à la croisée des deux thèmes. Ce sont en effet les modifications de structure à apporter aux matériaux textiles qui confèrent un aspect sensoriel particulier qui intéressent en partie les industriels. Les moyens de rehausser la qualité perçue au niveau de la douceur d'une couche bébé, produits hautement sophistiqué constitué majoritairement de multi-couches de matériaux non-tissés, sont un enjeu de taille pour accroître ses parts de marché surtout lorsque la concentration des entreprises dans ce secteur est poussée à ses limites.

2.2 PRESENTATION DES TRAVAUX REALISES DANS LE THEME 1

La trame qui sous-tend nos recherches sur la structure des matériaux textiles et leur relation avec les propriétés attendues correspond à une forte attente de la part des industriels dans leur phase de conception des produits. Les besoins des industriels se traduisent par la mise au point d'un modèle qui permet d'optimiser les paramètres de structure des matériaux souples en fonction des propriétés recherchées. Parallèlement, les industriels aspirent, à terme, à une meilleure connaissance du comportement des matériaux textiles et une optimisation des paramètres de fabrication. Les industriels peuvent alors envisager une diminution des temps et des coûts de recherche et de développement des nouveaux produits. La validation de nos

travaux s'est réalisée au travers des matériaux depuis le plus petit élément constitutif d'un textile, à savoir la fibre ou le filament, jusqu'à l'étoffe. Sur l'ensemble des matériaux textiles, nous avons porté une attention toute particulière aux matériaux non-tissés sans négliger les structures linéaires élémentaires. A la différence des étoffes traditionnelles qui sont tissés ou tricotés, les non-tissés sont constitués d'un enchevêtrement de fibres ou de filaments liés ensemble par fusion, par un liant chimique ou par friction (mécaniquement). Le matériau textile est un matériau très particulier, dans le sens où il est possible de lui conférer une très grande résistance (dynamométrique, à l'abrasion, à la déchirure, à la perforation, ...) tout en étant souple et léger. C'est entre autre la raison pour laquelle les matériaux textiles sont souvent une solution lorsque deux ou plusieurs fonctionnalités sont simultanément espérées (drapé et résistance, imper-respirabilité et protection au feu, etc...). Il offre en outre une particularité très intéressante : c'est un matériau discontinu et qui, parmi l'ensemble des matériaux industriels, offre une très grande surface de contact. A titre d'exemple, un matériau non-tissé offre plus de 90% de vide en volume, chaque fibre ou filament constitutif pouvant être assimilable à un cylindre d'une vingtaine de microns. Cette particularité conduit à tout un ensemble de propriétés qui sont largement exploitées dans de très nombreux domaines. La grande surface d'échange offerte et sa capacité d'absorption sont utilisées par exemple dans le domaine de la filtration ou encore de l'hygiène (une couche culotte est majoritairement constituée de non-tissés, tous les filtres dans une automobile ou encore les membranes dans les séparateurs de batteries). Le marché des non-tissés connaît une croissance relativement forte pour un secteur industriel d'environ 8% par an (source EDANA¹² en 2005). Ils sont utilisés principalement dans le domaine de l'hygiène (couches bébés, incontinence adulte, essuyage industriel et domestique, ingénierie civile, etc...) et peuvent être produits à des vitesses relativement élevées (jusqu'à 500m/mn sur une laize de 5m pour des non-tissés transformés en voie fondue) ce qui diminue d'autant le prix de revient industriel. L'ensemble de ces avantages en fait un matériau de choix qui tend à remplacer de plus en plus d'autres matériaux dans des domaines d'application de plus en plus large (agriculture, médical, ...). Son coût de production relativement faible lui offre aussi la possibilité d'être jetable bien que l'on sache fabriquer des produits durables par le même type de procédé. Les procédés de fabrication sont si performants qu'une large part de son coût est représentée par la fibre (près de 50% pour des fibres classiques et jusqu'à 80% pour des fibres techniques résistantes au feu). Ceci renforce l'intérêt des industriels pour optimiser au mieux la structure des matériaux en conservant des qualités identiques, tout en diminuant la part de la matière première mise en œuvre. Pour répondre à la demande du marché et aux exigences de leurs clients, les industriels ont besoins d'atteindre des caractéristiques très spécifiques. La collection d'échantillons à destination de nos mesures s'est constituée en concertation avec des industriels de la région Nord-Pas-de-Calais et se destine au domaine de la filtration. Toutefois, la démarche adoptée dans nos travaux peut, à condition d'adapter les paramètres internes des modèles proposés, être étendue à d'autres propriétés fonctionnelles et d'autres matériaux. Communément, une approche de modélisation admise consiste à partir des paramètres de fabrication du produit de les mettre en relation avec les propriétés attendues sur ce produit. Volontairement, afin d'obtenir une meilleure compréhension des non-tissés d'une part et d'obtenir une interprétation plus proche du produit et applicable dans un plus grand nombre d'entreprises, indépendamment du procédé employé et du matériau textile, nous avons fait le choix de nous pencher directement sur les paramètres de structure qui influent sur les propriétés espérées. Ceci nous offre en outre la capacité de prévoir quel procédé pourrait être le mieux adapté pour atteindre une propriété particulière. La démarche scientifique générale retenue dans cette thématique est représentée à la Figure 1. Notre

¹² EDANA : European Disposables and Nonwovens Association (www.edana.org)

premier travail consiste à sélectionner des familles de produits obtenus par des procédés de fabrication distincts avec les mêmes attentes au niveau des performances (modèle de type MISO : Multiple Input-Single Output). Dans le cas où plusieurs propriétés fonctionnelles seraient attendues, il est toujours possible de décomposer un système MIMO (Multiple Input-Multiple Output) en un système MISO. L'espace des variables d'entrée est constitué de tous les paramètres de structure des matériaux. L'espace de sortie comprend une seule variable qui exprime la propriété fonctionnelle. Pour garantir le succès des phases d'apprentissage, la sélection des échantillons doit nous permettre à la fois de couvrir une large gamme de structure des matériaux avec des variations significatives au niveau de la qualité attendue. La structure du premier thème de recherche se décompose chronologiquement selon les 4 étapes suivantes :

Etape ① (cf. Figure 1) : *identification et mesures des paramètres de structure des matériaux textiles* (cf. Figure 3)

Il s'agit à cette étape d'identifier de manière exhaustive les paramètres de structure communs et spécifiques des échantillons en fonction de leurs origines et de mesurer ces paramètres. Pour la plus grande partie des mesures objectives, il existe des appareils spécialisés et normalisés particulièrement bien adaptés. La liste de ces paramètres qui caractérisent la structure du matériau requière une bonne expertise dans le domaine concerné, à savoir le textile. Cette première source d'information ne peut se construire qu'auprès d'experts professionnels du contrôle qualité ou des centres de Recherche et de Développement (R&D). Les valeurs mesurées de ces paramètres constituent le vecteur d'entrée de nos modèles.

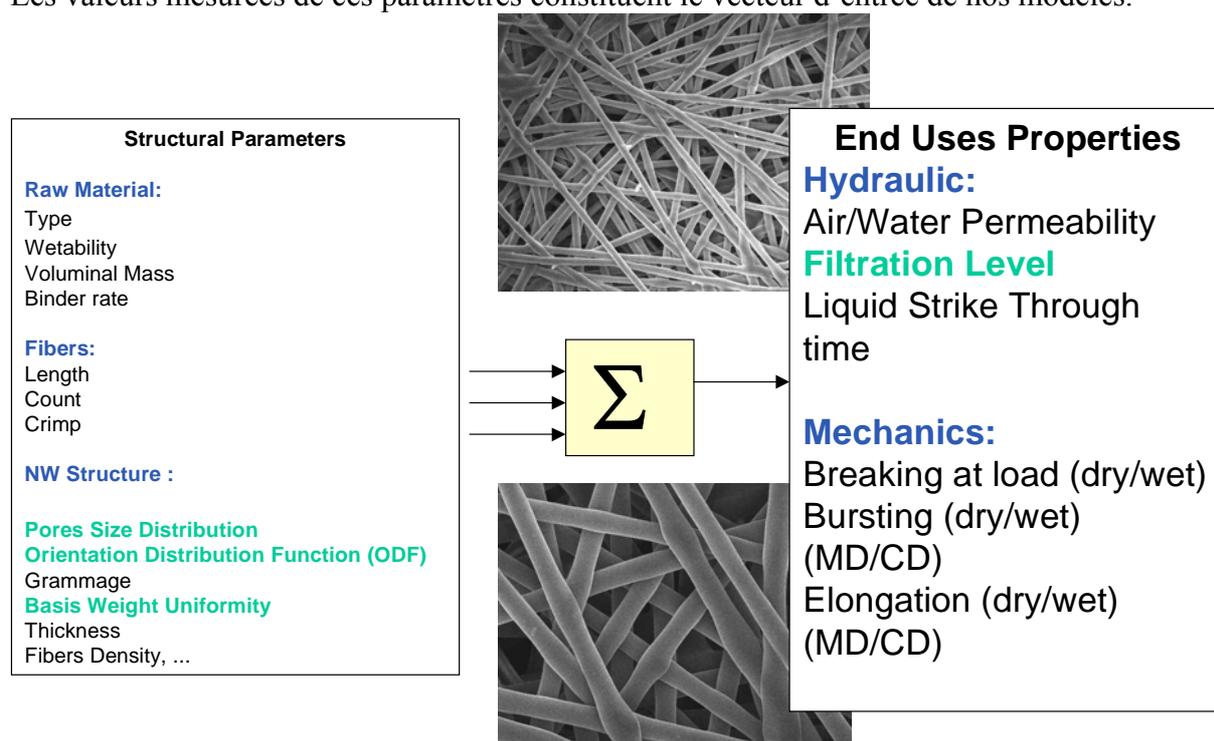


Figure 3 : identification de l'ensemble des variables propres aux matériaux (exemple appliqué au matériau non-tissés lié par voie chimique – photographies MEB¹³)

Etape ② (cf. Figure 1) : *introduction de nouvelles méthodes de mesure précises des paramètres de structure adaptés aux matériaux textiles*

A partir de la liste exhaustive constituée à la première étape, on constate qu'un grand nombre de paramètres de structure dans le domaine des matériaux textiles sont assez aisément

¹³ MEB : Microscope Electronique à Balayage

quantifiables. En métrologie textile, la mesure du titre¹⁴ d'un fil ou d'une fibre mis en œuvre ou encore de la masse surfacique de l'échantillon est aisée. Toutefois, dans un nombre plus restreint de cas, les paramètres de structure identifiés qui ne possédaient pas de moyens de caractérisation existants ou pour lesquels les moyens de mesures existants n'étaient pas suffisamment précis ou fiables, nous ont conduit à définir de nouvelles méthodes de caractérisation. La précision et le succès du modèle de l'étape 4 ne peuvent être garantis que par l'usage de mesures robustes et précises. Pour l'ensemble de tous ces paramètres, nous devons proposer des méthodes de mesure et, dans un grand nombre de cas, l'analyse d'images ou le traitement de l'information sont à même d'apporter des solutions. La construction de la liste des paramètres auprès des experts ne sera pas abordée dans ce mémoire. En revanche, nous reviendrons à l'étape suivante sur le recueil de la connaissance humaine auprès de ces mêmes experts.

Etape ③ (cf. Figure 1) : *sélection des paramètres de structure pertinents par rapport à l'application retenue avec introduction de la connaissance humaine*

Eu égard à l'explosion du nombre de paramètres de structure distincts des matériaux et de la disponibilité d'un faible nombre d'échantillons, il est nécessaire d'introduire une procédure de classement des paramètres pertinents à l'entrée du modèle de corrélations. Cette étape vise à réduire non seulement la complexité du modèle et donc accroître sa précision et sa lisibilité, mais encore elle offre la possibilité de mieux comprendre quels sont, par ordre d'importance, les paramètres et leur combinaison qui influent sur la propriété du matériau. Le faible nombre d'échantillons est une contrainte très souvent observée lorsque l'on traite des produits industriels dont le procédé de transformation est trop lourd à reconfigurer ou bien lorsque les contraintes de production ne permettent pas la mobilisation de l'outil. Dès lors, il n'y a pas d'autre solution que de multiplier les sources d'informations pour compléter les données mesurées sur la collection d'échantillons disponibles. C'est la raison pour laquelle nous avons fait appel à la connaissance experte.

Etape ④ (cf. Figure 1) : *mise en place des modèles de corrélations entre les paramètres de structure et une propriété fonctionnelle attendue (cf. Figure 4)*

Les modèles que nous avons proposés sont basés sur des techniques du flou. Une grande partie de nos travaux se sont attachés à construire, simplifier et optimiser des modèles neuronaux ou flous. Le plus souvent nous avons proposé une adaptation des entrées pour prendre en considération soit la spécificité de notre problématique, à savoir le faible nombre d'échantillons disponibles ou encore pour accroître la lisibilité du modèle obtenu et concourir à une meilleure compréhension des relations bâties et offrir un outil pour l'aide à la conception des matériaux textiles. Ces avancées ont été faites avec le souci d'optimiser dans le même temps les paramètres internes de nos modèles. Les liaisons entre les paramètres de structure des matériaux et les propriétés espérées sont des relations complexes. Dès lors, les modèles proposés dans nos travaux peuvent être considérés comme des modèles d'approximation de fonctions complexes fortement non-linéaires.

¹⁴ Titre : masse linéique d'une structure linéaire textile (fibre, filament, multi-filaments ou fil et ses dérivés)

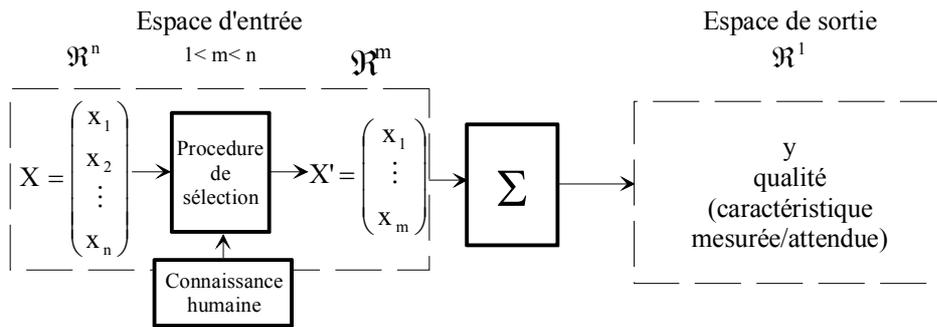


Figure 4 : représentation du modèle de prévision d'une propriété fonctionnelle en fonction des valeurs des paramètres de structure

2.2.1 Introduction de nouvelles méthodes de mesure précises des paramètres de structure adaptés aux matériaux textiles

Comme énoncé précédemment, le matériau textile, sous toutes ses formes, à l'exception de ses structures élémentaires (fibres, fils et filaments), définit un réseau très complexe de pores connectés les uns aux autres qui guide une grande partie ses propriétés mécaniques et hydrauliques (cf. Figure 5). La principale difficulté de ce maillage très dense, à l'échelle de quelques dizaines de microns, réside dans le degré de connexion entre les interstices. A une échelle plus faible encore (de l'ordre de quelques dizaines de nanomètre), la topographie de surface des structures linéaires élémentaires agissent sur les propriétés de friction dans le plan de glissement de celles-ci et au final influe en partie sur les propriétés mécaniques. A une échelle macroscopique, ce sont la régularité de la distribution des fibres dans le plan du matériau, leur orientation, par exemple, qui modifient la cohésion au final du matériau et expliquent partiellement l'écoulement des fluides. Durant mes travaux de DEA, afin de modéliser les phénomènes de capillarité dans le procédé d'encollage d'un fil de polyéthylène téréphtalate dans la chaîne de production de l'entreprise RHONE-POULENC, une caractérisation des interstices délimités par les mono-filaments de coupes transversales du fil ont été rendues nécessaires [D1][P1]. Les équations de la mécanique des fluides, appliquées aux coupes successives par le suivi de la surface offerte au liquide, permettent de quantifier l'emport de colle par le fil et de participer au suivi de qualité de la production. La difficulté de définir les surfaces des interstices, nous a conduit, par le biais de techniques de traitement d'images, de définir des surfaces floues qui seront empruntées par le fluide au sein du fil. Afin de mieux caractériser les interstices, nous avons pris conscience que de nombreuses formes dans la nature présentaient une structure fractale, jusque dans la distribution des interstices dans la coupe transversale du fil ou encore la morphologie de fibres naturelles. Le concept de géométrie fractale fournit en effet un cadre solide pour l'analyse des phénomènes naturels complexes au sein des matériaux textiles (tissus, fibres, surfaces de fibres, ...). Parmi l'ensemble des paramètres permettant de caractériser la géométrie fractale, la dimension fractale est la plus importante. Par le biais de simulations et une lecture fine des travaux existants, nous avons pu mettre en évidence que les méthodes actuelles d'estimation de la dimension fractale étaient sujettes à des erreurs de précision [P3]. A différentes échelles, nous avons cherché à caractériser et à mesurer finement les paramètres de structure des matériaux textiles.

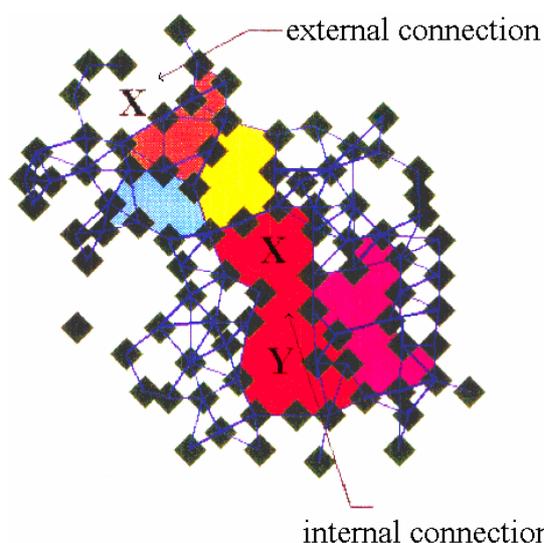


Figure 5 : identification des pores et de leur connexion dans une coupe de fil

2.2.1.1 METHODES DE MESURES BASEES SUR L'ANALYSE D'IMAGES DES MATERIAUX TEXTILES

► De l'échelle microscopique,

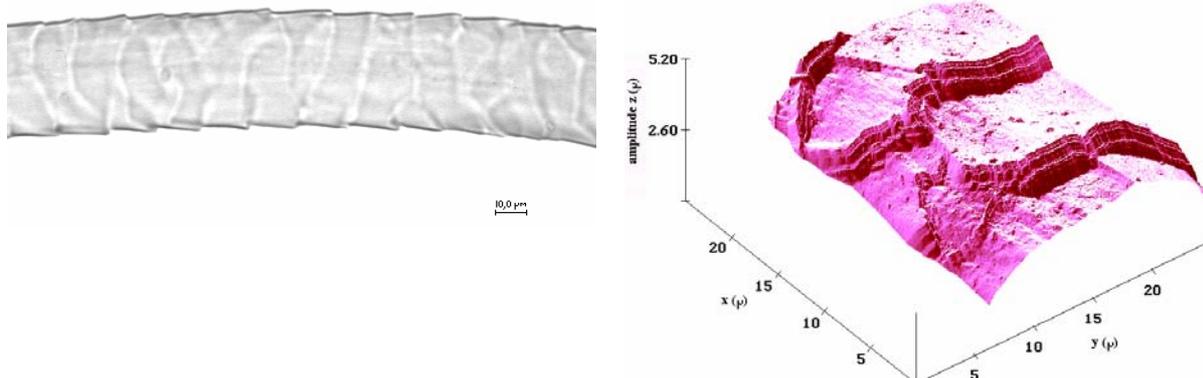


Figure 6 : Fibre de laine australienne observée au microscope optique et au microscope à force atomique – dimension fractale des profils de surface proche de 1,15.

Ce travail a été effectué dans le cadre de ma thèse de doctorat. Les résultats ont été publiés ou présentés dans [P2]-[P3], [C1]-[C4]. Nous avons utilisé et optimisé le modèle flou de ABE[ABE-95] décrit plus loin pour réaliser cette estimation.

La dimension fractale est un paramètre important décrivant des textures naturelles. Sa valeur peut être comprise dans l'intervalle $[0, 1]$ pour les poussières, $[1, 2]$ pour les séries temporelles ou $[2, 3]$ pour les surfaces. Plus la valeur de la dimension fractale est grande, plus la structure fractale a tendance à remplir l'espace dans lequel elle est plongée et plus la densité de poussière, du profil ou encore de la surface apparaissent rugueux. Au cours de mes travaux de thèse, nous avons étudié uniquement la dimension fractale pour des profils unidimensionnels, c'est à dire : des graphes de fonctions continues mono-valuées d'une seule variable C'est dans ce cadre que nous avons été conduits à réaliser un estimateur de la dimension fractale conciliant à la fois une grande précision, une mise en œuvre simple et une bonne maîtrise des relations entre les paramètres liés à la géométrie fractale et la précision de l'estimation [P3]. La mise en place des relations est réalisée par le développement d'une méthode basée sur la logique floue [P1]. Le modèle proposé d'estimation de la dimension fractale a donc été transformé en un modèle d'approximation de fonctions complexes fortement non-linéaires. Afin de garantir les critères de précision, de mise en œuvre simple et

de bonne lisibilité du modèle, la définition d'une méthode hybride combinant la logique floue et l'algorithme génétique a été étudiée au travers de la décomposition du modèle flou sous forme de structure hiérarchique[P2]. D'autre part, toujours dans le but de garantir une bonne précision, une méthode d'optimisation des paramètres internes du modèle flou est proposée. Pour valider la méthode d'estimation de la dimension fractale, le modèle a été appliqué sur des courbes fractales synthétiques de dimension fractale théorique connue et, puisque l'étude de la dimension fractale est un outil destiné aux physiciens et à nos travaux sur les matériaux textiles, sur un phénomène naturel qu'est la fibre de laine (cf. Figure 6).

La précision d'estimation de la dimension fractale influence les résultats finaux des applications de la géométrie fractale. De nombreux estimateurs, comme la méthode de box-counting [TRI-88], la méthode de variation [DUB-89], la méthode de Bouligand-Minkowski [DUB-89], la méthode du spectre de puissance [TRI-88], ont été proposées. Selon les résultats expérimentaux apparaissant dans nos références, la précision de ces estimateurs est fortement liée à la vraie valeur de la dimension fractale D , à l'effet de résolution [HUA-94] et à la tendance du profil ou de la surface [MAN-89]. Les éléments précédents affectent la précision d'estimation de manière systématique. Pourtant, il est difficile de déterminer exactement comment ces éléments influencent la précision d'estimation car il existe une forte corrélation entre tous les éléments impliqués. La précision de l'estimation peut être aussi influencée de manière stochastique. Les erreurs stochastiques sont liées au choix de quelques paramètres internes de l'estimateur. Nous avons proposé une méthode permettant d'améliorer la précision du calcul de la dimension fractale par approximation d'une fonction continue selon le schéma de la Figure 7. La procédure d'estimation de la dimension fractale (D) s'effectue en deux étapes :

- l'étape de pondération : elle permet d'obtenir une moyenne pondérée D_{e1} de la dimension fractale à partir d'un ensemble de mesures effectuées selon la méthode du dénombrement des boîtes (box-counting). Les erreurs stochastiques peuvent être largement diminuées à cette étape et une relation déterministe entre D et D_{e1} peut être obtenue. Pour chaque valeur de D_e , générée par la méthode du dénombrement des boîtes, nous calculons le poids correspondant en fonction de sa distance à la moyenne de toutes les données mesurées.

-l'étape d'approximation : elle est basée sur un Contrôleur en Logique Floue (C.L.F) de type ABE [ABE-95] afin d'estimer la différence entre D et D_{e1} , notée $\Delta\hat{D}$. Dans ce C.L.F., la procédure de fuzzification permet de partitionner l'intervalle de $\Delta\hat{D}$ en sous intervalles et l'espace des variables d'entrée en sous espaces. Les règles floues sont extraites à partir d'une base d'apprentissage contenant des fonctions de dimensions fractales connues. Ces règles permettent de décrire la relation complexe entre la précision d'estimation de la dimension fractale et des éléments systématiques tels que la moyenne pondérée D_{e1} , la densité dans la direction horizontale $DENS_h$, la densité dans la direction verticale $DENS_v$, la rugosité $\langle RD, SW \rangle$ et le nombre d'échantillons Q .

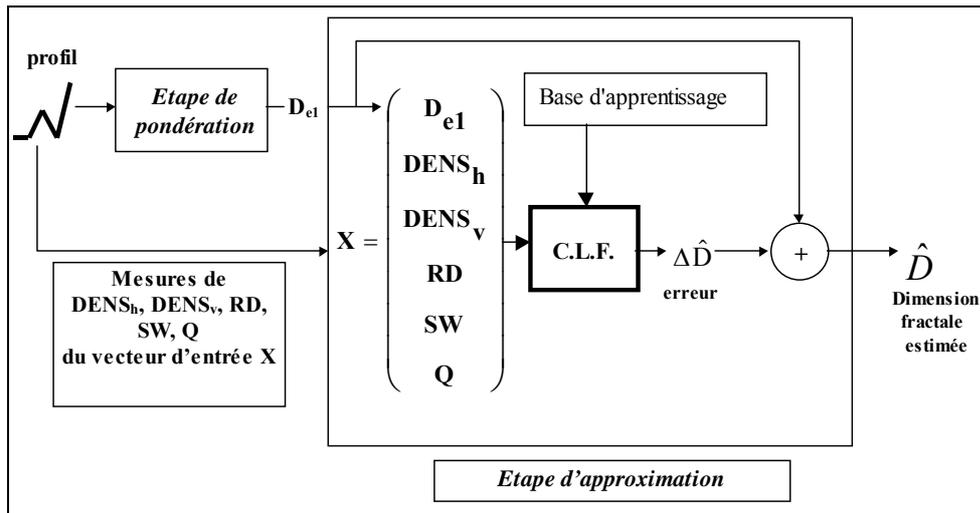


Figure 7 : Schéma général de l'estimateur de la dimension fractale proposé

Notre estimateur est obtenu uniquement à partir des données d'apprentissage. En utilisant cet estimateur, les erreurs de l'estimation de la dimension fractale peuvent être largement diminuées car les erreurs stochastiques sont compensées entre elles à l'étape de pondération et les erreurs systématiques sont estimées à partir du C.L.F.

Les six variables d'entrée sont liées à des éléments déterministes affectant la précision de l'estimation. Leurs formalisation mathématique et significations physiques sont détaillées dans [P3]. Dans la mesure où la vraie valeur de D est utilisée afin de caractériser la rugosité ou l'irrégularité d'un profil, elle est certainement corrélée avec d'autres variables décrivant la rugosité et l'irrégularité.

A partir des résultats de simulation présentés dans [P3], nous constatons que l'estimateur proposé améliore largement la qualité de l'estimation de la dimension fractale. En particulier, il confirme les résultats obtenus par BIGERELLE et IOST [BIG-96], qui utilisent une méthode basée sur les auto-corrélations moyennées.

► à l'échelle macroscopique

Les méthodes de mesures employées entraînent le plus souvent des mesures indirectes d'un grand nombre d'échantillons d'une taille donnée. La difficulté majeure réside dans le fait que ces mesures sont le plus souvent dépendantes de la taille de l'échantillon observée ou bien qu'une méthode appropriée n'est pas disponible. Même si il ne s'agit pas d'un concept novateur, l'usage de méthodes d'analyse d'images pour déterminer l'homogénéité de la distribution des fibres, la distribution de la taille des pores ou encore le taux de recouvrement du liant chimique sur les fibres reste efficace. En particulier, elles deviennent performantes lorsque le système d'acquisition de l'image est très précis. Pour l'acquisition d'images, nous avons utilisé un système de profilométrie 3D optique sans contact acquis dans le cadre du projet régional PRTH. La surface topographique (cf. Figure 10) est acquise par un capteur optique sans contact, ce qui assure que la structure du non-tissé n'est pas modifiée. La précision dans le sens z est inférieure à 10 nanomètres et il n'y a donc pas d'altération de l'information lors des prétraitements d'images (binarisation, squelettisation, etc...). Pour estimer l'homogénéité massique des non-tissés, nous avons utilisé une caméra CCD avec une source lumineuse intense transmise au travers du non-tissé. La lumière est une source monochromatique issue de LEDs (diodes électroluminescentes) qui nous permet d'ajuster son intensité sans craindre de modifier la température de la couleur ou encore de modifier sa longueur d'onde. La stratégie pour déterminer l'uniformité de la distribution des fibres dans le

non-tissé a été mise au point au cours de mon séjour dans le laboratoire américain de l'université de la Caroline du Nord. Elle est basée sur la variation de la densité optique en utilisant une méthode statistique. L'indice calculé (cf. Figure 9) reflète la variation entre une distribution aléatoire et homogène (loi de Poisson) et la distribution observée [P4]. Cet index a une valeur comprise dans l'intervalle [0, 1]. Plus sa valeur tend vers 1, plus la distribution des fibres dans le sens de la laize du produit est homogène et réciproquement pour une valeur nulle de l'index. Le capteur de distribution massique a été développé en prenant en considération les contraintes liées à la vitesse élevée de production (500 m/mn) pour retourner une indication en temps réel et précise (cf. Figure 8). L'épaisseur ou encore le taux de recouvrement du liant chimique sur les fibres ont été calculés directement à partir de l'analyse d'images de la surface topographique du non-tissé ou de l'image issue du Microscope Electronique à Balayage.

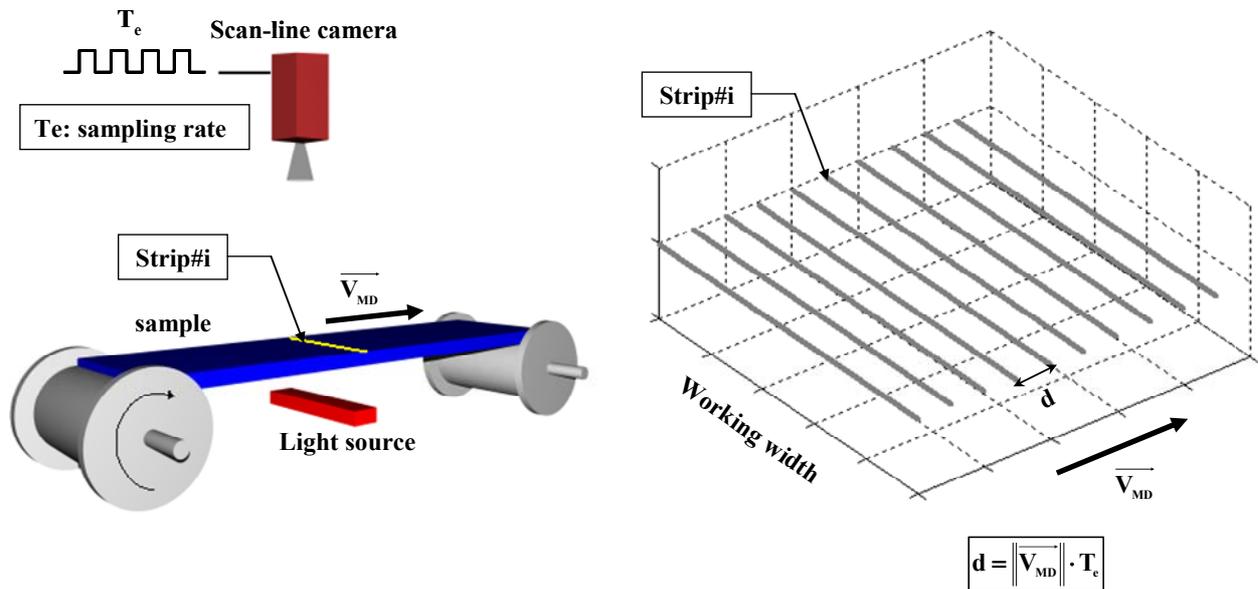


Figure 8 : capteur en ligne d'inspection de l'uniformité massique des voiles de matériaux non-tissés

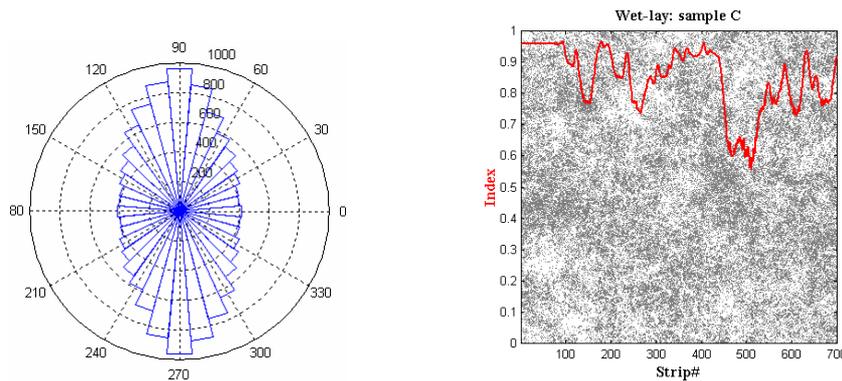


Figure 9 : Fonction de distribution de l'orientation des fibres et index d'homogénéité massique

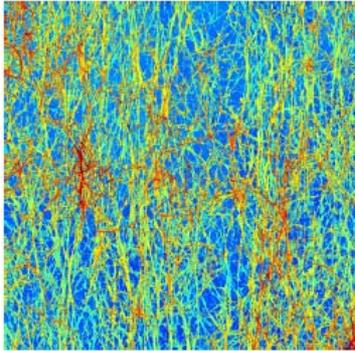


Figure 10 : représentation de la topographie d'un non-tissé en fausses couleurs (altitude)

La fonction d'orientation des fibres dans un non-tissé est un paramètre clé. De nombreuses propriétés fonctionnelles dépendent de ce paramètre, comme la résistance, l'allongement, la porosité ou encore le seuil de filtration. Au sein de l'industrie textile, ce paramètre est actuellement estimé en effectuant le rapport entre les forces de rupture dans deux directions orthogonales privilégiées, à savoir : le sens de fabrication du non-tissé et le sens directement orthogonal. De nombreux travaux ont été étudiés pour mesurer de façon plus précise ce paramètre. Notre méthode est basée sur la transformée de Fourier discrète [POU-96][POU-97]. A partir d'une image ($f(x, y)$ de $N \times N$ pixels), nous calculons la transformée de Fourier : $F(u, v) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cdot e^{-j2\pi(xu+yv)/N}$ avec $(u, v) \in [0, N-1]^2$ et à la suite son spectre de puissance ($\log|F(u, v)|$) (cf. Figure 11).

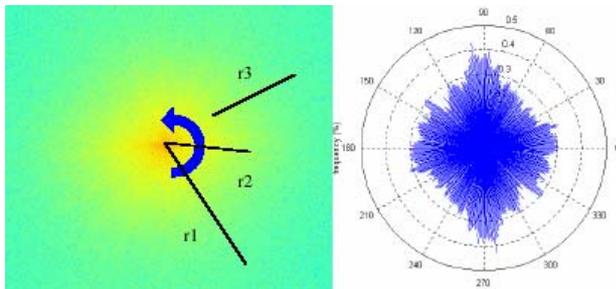


Figure 11 : spectre de puissance et représentation polaire de l'orientation des fibres de la Figure 10

Nous avons introduit, à partir de la représentation polaire de l'orientation des fibres, un critère prenant en compte le rapport entre les fibres orientées dans le sens du procédé de fabrication et le sens travers. Ce critère a été comparé à celui réalisé communément dans l'industrie textile et il apparaît bien comme étant un paramètre plus pertinent que celui actuellement réalisé. En effet, communément, pour approcher l'orientation des structures élémentaires dans le matériau, on réalise un rapport des forces dynamométrique dans le sens de fabrication par rapport au sens travers. Cette mesure n'est pas le reflet réel de la distribution de l'orientation des structures élémentaires dans le matériau, mais sous l'hypothèse que toutes les structures élémentaires soient homogènes (en titre, en répartition massique), ce ratio donne une idée des orientations dans les deux directions privilégiées du matériau.

Pour estimer la distribution de la taille des pores, nous construisons de façon récursive les courbes de niveau de l'image en nous basant sur un algorithme de lignes de partage des eaux. A partir d'une image binarisée et squelettisée, les pixels de l'image correspondant au fond sont affectés à la valeur nulle, tandis que les pixels du squelette des fibres prennent la valeur un. Après extraction des minima locaux, le centre des pores et ainsi que leur taille sont identifiés (cf. Figure 12).

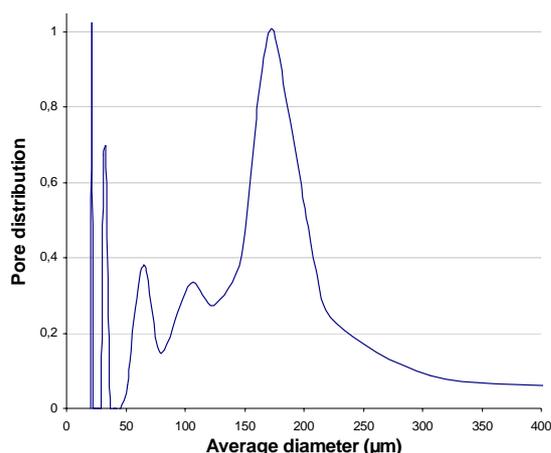
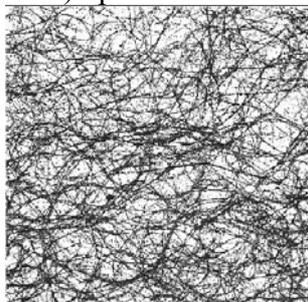


Figure 12 : fonction de distribution de la taille des pores de la Figure 10

Les méthodes décrites ci-dessus sont simples à programmer et donnent des résultats prometteurs. Cependant, il est difficile de définir quelle est la taille exacte de l'échantillon à observer. La surface observée ainsi que la résolution spatiale affectent la performance des résultats. C'est la raison pour laquelle nous avons mis à l'épreuve ces nouvelles techniques soit à partir d'images simulées ou encore d'échantillons présentant des caractéristiques bien connues (cf. Figure 13 et Figure 14). Pour explorer la performance de nos méthodes, nous avons examiné nos échantillons en faisant varier la résolution spatiale ou encore leur taille. Par exemple, nous nous sommes procurés des échantillons dont nous savions que le procédé de fabrication entraînait une distribution aléatoire presque parfaite de l'orientation des fibres. Nous savons alors que la représentation polaire devait tendre vers un cercle parfait dans toutes les directions. A chaque fois, pour déterminer quelles étaient la résolution (cf. Figure 15) et la taille (cf. Figure 16) optimales nous avons estimé le RMSE¹⁵.



surface: 6×6 mm²
région de 500×500 pixels

Figure 13 : topographie de surface d'un échantillon issu de la voie aérodynamique (niveau de gris) avec des fibres d'un diamètre de 12µ

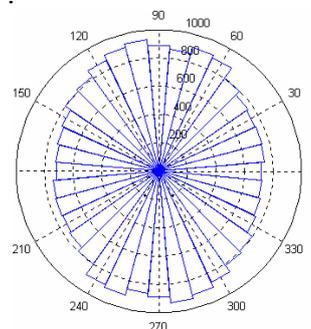


Figure 14 : Orientation des fibres pour un échantillon issu de la voie aérodynamique (en degrés)

¹⁵ RMSE : Root Mean Square Error

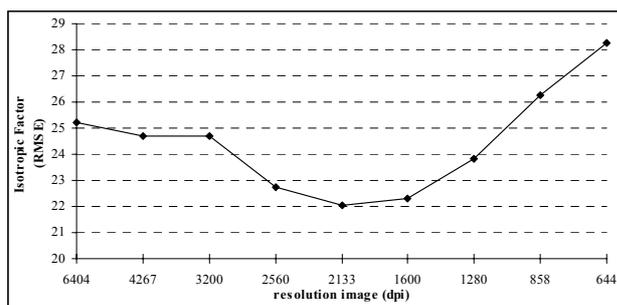


Figure 15 : effet de la résolution spatiale - RMSE en fonction de la résolution de l'image avec le même grossissement

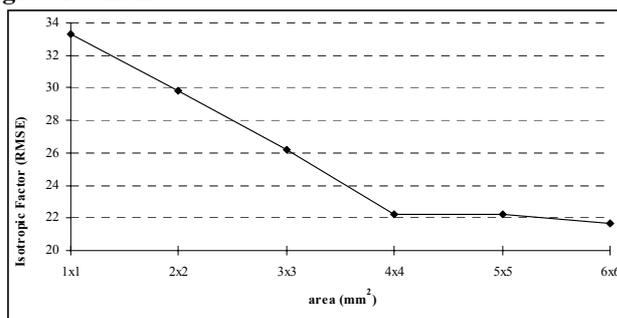


Figure 16 : Influence de l'effet de la taille observée – RMSE en fonction de la surface avec une résolution de 2133 dpi (points par pouce)

Nos résultats nous ont conduit à mettre en évidence que la résolution spatiale optimale correspond à 2133 points par pouce. Cette valeur correspond au diamètre des fibres. En fait, durant l'acquisition de l'image, il faut qu'au moins un point soit acquis par fibre présente dans le non-tissé. En dessous de cette résolution, il y a une perte d'information. Au dessus, il y a une redondance d'information qui entraîne une baisse de la précision de mesure. Les autres résultats montrent qu'une taille de l'échantillon optimale tourne autour de 6 x 6 mm². Ces résultats sont très intéressants pour les industriels. En effet, cela implique que nos mesures deviennent correctes avec une image de 500 x 500 pixels (2133 dpi – 6 x 6 mm²). Le temps d'acquisition de la topographie étant relativement long, ces résultats montrent que l'on peut obtenir des mesures précises en un temps raisonnable.

Plus récemment, dans le cadre des travaux de DEA et la thèse de Mohamed Dimassi [D6][T5], nous approfondissons les premiers résultats obtenus durant mes travaux de DEA [P1] sur l'extraction de la distribution de la taille des pores (PSDF: Pores size Distribution Function). Nous avons mis en évidence que les matériaux non-tissés de très faible épaisseur ont un comportement qui n'est pas régi par les équations de diffusion classiques des liquides dans un milieu poreux. Fatt a introduit en 1956, un modèle pour les milieu poreux [FAT-56] en géologie. Ses travaux se sont portés sur les roches mères, véritables éponges à pétrole. Plus récemment, d'autres travaux similaires dans le même domaine ont été conduits [BAK-96] [BLU-91] [BLU-95] [DEL-99a&b] [DEL-02] [DEN-93] [HID-02] [LIN-99] [ØRE-98]. Au niveau des non-tissés, la littérature montre que des recherches en ce sens ont été menées par analyse d'images en mesurant le déplacement du front de liquide [POU-96] [POU-97] [MAR-92] [MAR-97] [MCB-94] [REB-95] [ZEN-00a]. L'extraction de paramètres caractérisant les pores et son réseau et permettant une classification des matériaux en fonction de leurs propriétés hydrauliques ont aussi été menés [AND-96][PER-00][PER-01].

Quelques appareils spécifiques ou méthodes indirectes ont été développés pour construire le diagramme de la PSDF, tels que le poromètre, les rayons X [VEN-00] ou encore le microscope à balayage électronique. Pour les deux dernières techniques, les surfaces observées sont de taille si réduites qu'il est difficile d'en extraire une information pertinente. Le principe du poromètre est basé sur la mesure de la perte de charge à débit constant pour

chasser un liquide très mouillant au travers des pores du matériau. Le poromètre identifie tout d'abord les plus gros interstices pour terminer par les plus petits et retourne le diagramme du diamètre équivalent des pores. Cependant, ce dernier n'est pas le vrai diagramme dans la mesure où les petits interstices nécessitent une énergie considérable pour être vidés. De plus, dans cette mesure, il n'est pas possible de prendre en considération la géométrie des pores. La taille du pore, au travers de son diamètre équivalent, n'est pas une information suffisante pour le décrire précisément et les connexions ne sont pas mises en évidence dans ce diagramme. Afin de bien comprendre la structure et plus précisément les formes géométriques qui définissent un pore et la manière dont les effluents liquides se déplacent dans la structure, nous avons mis en place un banc de test (cf. Figure 17). Il est constitué d'une caméra numérique pilotée par un ordinateur. L'échantillon est observé par le biais d'un microscope et est éclairé en lumière transmise homogène en tout point par une plaque munis d'électrodes lumineuses de forte intensité. Le contact du liquide très mouillant¹⁶ avec l'échantillon déclenche l'acquisition d'une séquence vidéo qui est analysée. Dès lors, nous avons accès à un grand nombre d'informations concernant la géométrie des pores (rayon équivalent et excentricité -rapport du grand axe sur le petit axe de l'ellipse inscrite dans le pore, cf. Figure 19) et le suivi séquentiel du déplacement du liquide dans la structure. Normalement, les déplacements de fluide dans un capillaire en fonction du temps t suivent la Loi de Washburn [WAS-21], à savoir :

$$h^2 = r^2 \left(\frac{\Delta P_L}{4\eta} \right) t$$

où $\Delta P_L = 2\sigma \cos\theta / r$ est la pression de Laplace, h définit la hauteur du front de liquide à l'instant t , r est le rayon équivalent du pore, σ l'énergie de surface, η la viscosité du liquide et θ l'angle de contact entre le liquide et les fibres.

Dans notre dispositif, chaque pore est identifié et l'on peut suivre en fonction du temps chaque remplissage jusqu'à l'équilibre (compétition entre la pesanteur, l'évaporation du liquide et les forces capillaires en jeu). A l'équilibre, le front de liquide doit atteindre la hauteur H en suivant la Loi de Jurin : $H = 2 \sigma \cos(\theta) / \rho g$ où g et ρ désignent respectivement l'accélération de la pesanteur et la masse volumique du liquide (James Jurin, Médecin anglais de 1684 à 1750 a établi cette loi en 1718).

L'analyse de nos images (cf. Figure 20), nous apprend que si le liquide dans un pore suit bien l'équation de Washburn, à l'échelle macroscopique, le liquide dans un matériau non-tissé ne suivent ni l'une ni l'autre loi de Washburn et de Jurin. En fait, la structure très fine des non-tissés nous apprend que la connexion entre les pores est déterminante dans l'ascension capillaire. Les petits pores servant de 'pompes' pour le liquide et les pores de taille plus importante de réservoir. Ce résultat important pour déterminer les propriétés hydrauliques du matériau nous confirme que l'étude du réseau poral au travers des connexions entre les petits interstices avec les plus gros et donc la géométrie alliée à l'orientation générale des fibres dans le réseau et la distribution massique des fibres sont les point clés pour la compréhension des écoulements liquides dans ces matériaux [C39]. Nos efforts se poursuivront dans ce sens avec la thèse de Mohamed DIMASSI [T5].

¹⁶ Liquide mouillant : liquide dont la tension de surface est très basse

Partie 2 : Présentation des thèmes de recherche

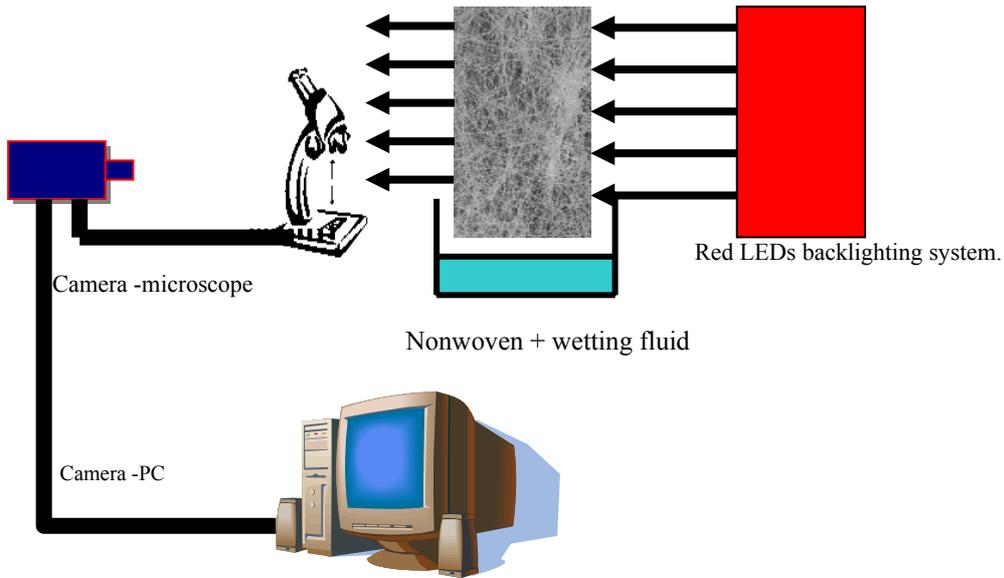


Figure 17 : banc d'acquisition d'images dynamiques d'ascension capillaire

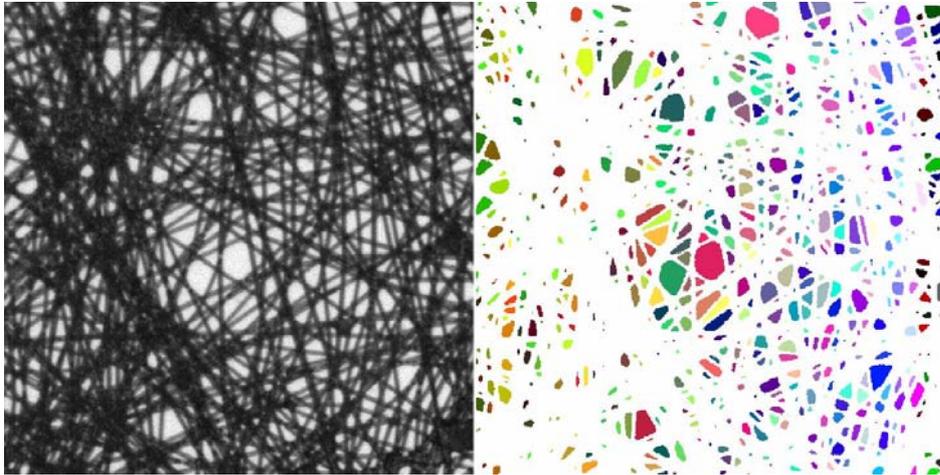


Figure 18 : image à niveaux de gris d'un non-tissés en voie fondue avec identification de ses pores

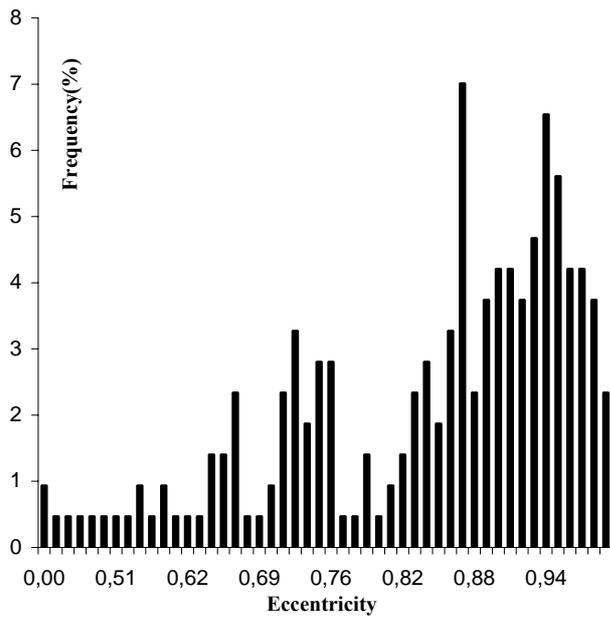


Figure 19 : distribution de l'excentricité de la forme des pores de la Figure 18

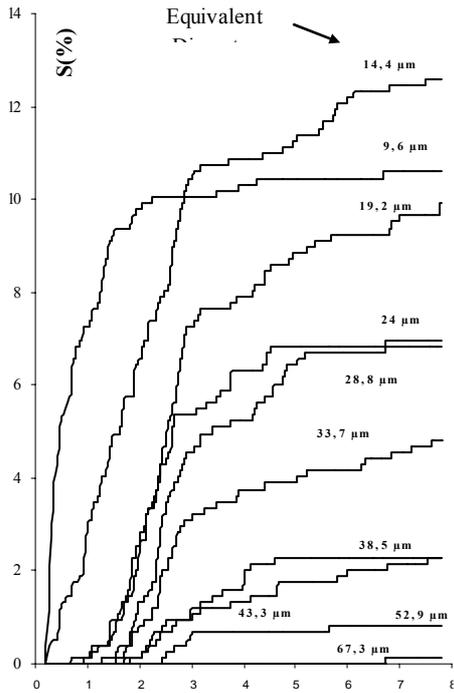


Figure 20 : distribution de la taille des pores remplis par un liquide mouillant de la Figure 18 en fonction du temps

2.2.2 Sélection des paramètres de structure pertinents par rapport à l'application retenue avec introduction de la connaissance humaine

Dans un système industriel, il existe une quantité importante de variables d'entrée et de sortie (grandeurs mesurables). Une modélisation utilisant la totalité de ces variables est un problème souvent trop complexe et les résultats correspondants sont alors difficiles à interpréter. Afin de réduire la complexité des modèles et d'obtenir des relations significatives entre l'entrée et la sortie du système, nous proposons, avant la modélisation, de sélectionner les variables d'entrée pertinentes, capables d'agir sur le système, et les variables de sortie pertinentes, capables de traduire le comportement du système. Les grandeurs qui ont peu d'influence sur le comportement du système sont éliminées de l'ensemble des variables d'entrée. De la même manière, les grandeurs qui traduisent incorrectement le comportement du système sont éliminées de l'ensemble des variables de sortie. En général, une modélisation basée sur les variables sélectionnées conduit à des résultats plus significatifs et en outre, le processus de sélection offre la capacité aux industriels d'identifier les paramètres clés et par conséquent les aide à mieux concevoir les produits en fonction d'une propriété à atteindre. De nombreux travaux similaires ont été effectués en reconnaissance de formes afin de réduire le nombre de variables (d'entrée et/ou de sortie) directement à partir des données [PEN-01]. Les méthodes existantes sont généralement divisées en deux catégories : l'extraction des variables et la sélection des variables. Dans la première catégorie, toutes les caractéristiques initiales sont projetées sur un sous espace multi-dimensionnel par minimisation d'un critère représentant la perte d'information. Cette catégorie comprend notamment l'Analyse en Composantes Principales (ACP) [FUK-90] et la Régression PLS (Partial Least Square) [LOH-89], qui effectuent une transformation linéaire d'un vecteur de caractéristiques. Dans la deuxième catégorie, les caractéristiques pertinentes sont directement sélectionnées à partir des caractéristiques initiales [BAT-94], [THA-97]. 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 comprennent la Recherche Séquentielle en Avant et la Recherche Séquentielle en Arrière. Des méthodes bien connues sont basées sur les arbres de décision [QUI-86], la méthode des plus proches voisins [CAR, 03] ou encore les réseaux connectionnistes qui permettent de retrancher les variables non significatives ou redondantes [LAS-01].

En général, les méthodes d'extraction donnent plus de précision que les méthodes de sélection, mais les variables extraites sont physiquement moins significatives que les variables sélectionnées. De plus, les méthodes basées sur une dépendance linéaire ne peuvent pas tenir compte des relations non-linéaires entre l'espace d'entrée et l'espace 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 l'industrie où l'on est souvent confronté à un faible nombre d'échantillons disponibles.

Afin de résoudre ce problème, nous avons proposé une autre méthode de sélection en définissant un critère de performance en postulant un principe de sensibilité des variables comme énoncé ci-dessous (cf. Figure 4) :

- si une faible variation de la variable d'entrée x_k ($k \in \{1, \dots, n\}$ et n désigne ici le nombre de variables d'entrée) provoque une grande variation de la variable de sortie y , alors y est considérée comme sensible par rapport à x_k ,
- si une grande variation de la variable d'entrée x_k provoque une faible variation de la variable de sortie y , alors y est considérée comme insensible à x_k .

A partir de ce postulat, nous avons mis au point un critère pour classer les paramètres en fonction de leur degré de pertinence [P10][P11][C5][C12][C16]. Le critère est divisé en deux parties :

- le premier membre VA intègre la connaissance humaine sur les non-tissés. Il prend ses valeurs dans l'intervalle $[0, 1]$. Lorsqu'il tend vers la valeur 1, cela signifie qu'il y a adéquation entre les tendances observées sur les paramètres de structure et les propriétés fonctionnelles mesurés des échantillons et la connaissance humaine plus générale sur les non-tissés. Si la connaissance humaine plus générale sur les produits est validée sur la collection de données mesurées, alors le degré de pertinence se voit renforcé. Ce critère met en lumière la cohérence des tendances décrites par les données mesurées par rapport à la connaissance a priori sur les produits considérés.

- le second membre prend en considération les valeurs numériques mesurées directement sur les échantillons. Il prend ses valeurs dans l'intervalle $[0, 1]$ et il est défini de telle façon que sa valeur (S_k) augmente lorsque la variable d'entrée x_k devient plus pertinente. Il est basé sur une mesure de sensibilité. Une entrée est considérée comme pertinente si une petite variation de cette dernière entraîne une forte variation de la propriété fonctionnelle (variable de sortie). La valeur de ce second membre tend vers 1, lorsque le paramètre d'entrée mesuré influe largement sur la propriété fonctionnelle.

Notons $X_s = (x_{s1}, x_{s2}, \dots, x_{sk}, \dots, x_{sn})^T$ le vecteur d'entrée correspondant aux paramètres de données mesurées sur le produit et $Y_s = (y_{s1}, y_{s2}, \dots, y_{sj}, \dots, y_{sm})^T$ le vecteur des sorties attendues sur ce même produit et qui correspondent à l'échantillon s ($s \in \{1, \dots, z\}$). Toutes les données mesurées sont préalablement normalisées pour retrancher les phénomènes d'échelle et la base de données comprend z échantillons. Pour classer les entrées pertinentes pour une sortie y_j donnée, nous définissons le critère C_k de la façon suivante ($(k,j) \in \{1, \dots, n\} \times \{1, \dots, m\}$) :

$$C_k = g_1 \cdot VA(x_k, y_j) + g_2 \cdot S_k$$

$$S_k = \frac{1 - \frac{2}{\pi} \cdot \tan^{-1} \left(\sum_{i \neq l}^z \frac{d(y_{ij}, y_{lj})}{d_k'(X_i, X_l)} \right)}{2}$$

$$\text{avec } d_k'(X_i, X_l) = \sqrt{d^2(X_i, X_l) - d_k^2(X_i, X_l)}$$

g_1 et g_2 sont deux coefficients positifs et $d(\cdot)$ signifie la distance euclidienne. g_1 et g_2 sont choisis de telle sorte d'ajuster le poids que l'on souhaite accorder à la connaissance humaine ou aux données mesurées. Ce critère est conçu pour rechercher le meilleur compromis entre les deux sources de connaissances. $d_k(X_i, X_l)$ correspond à la projection de $d(X_i, X_l)$ sur l'axe x_k . Plus grande est la valeur de C_k , plus pertinent sera le paramètre de structure (l'entrée) x_k .

Pour introduire la connaissance humaine dans le critère, nous proposons de diviser l'univers de la sortie y_j en o intervalles équivalents C_{jp} (cf. Figure 21). L'intervalle A_{kp} est construit à partir de l'ensemble des données en entrée x_k qui induisent une sortie dans l'intervalle C_{jp} de y_j . I_{kp} est alors généré par l'intersection de A_{kp} et de A_{kp+1} ($p \in \{1, \dots, o-1\}$).

La connaissance humaine sur le matériau a été recueillie auprès d'experts du département de R&D. Elle s'exprime sous forme linguistique et caractérise majoritairement les tendances issues de la connaissance a priori qui existent entre les variables d'entrée et les variables de sortie en fonction du contexte de l'application.

Un exemple de cette connaissance humaine entre les relations des paramètres de structure des matériaux non-tissés et de quelques propriétés fonctionnelles est illustrée dans le Tableau 1. Cette connaissance a priori est différente de la connaissance qui peut être extraite à partir des données mesurées directement sur une collection de produits.

En effet, dans la mesure où elle est le résultat d'une longue expérience, cette connaissance est plus générale que la connaissance spécifique qui peut être extraite d'une collection d'échantillons. La connaissance humaine peut alors être utilisée pour compléter ou corroborer des données mesurées et elle s'exprime sous la forme d'expressions linguistiques qui peuvent se formaliser sous la forme de règles du type :

SI x_1 croît ALORS y_1 croît (cf. Tableau 1): $R(x_1, y_1) = +1$,

SI x_k croît ALORS y_1 décroit : $R(x_k, y_1) = -1$

Si il n'existe aucune influence connue de x_k sur y_1 : $R(x_k, y_1) = 0$.

$$\left\{ \begin{array}{l} k \in \{1, \dots, n\}, VA(x_k, y_j) = \frac{1}{(o-1)} \sum_{p=1}^{o-1} va_p \\ p \in \{1, \dots, o\}, A_{kp} = [x_{kp}^{\text{inf}}, x_{kp}^{\text{sup}}] \text{ and } p \in \{1, \dots, o-1\}, I_{kp} = A_{kp} \cap A_{kp+1} \\ p \in \{1, \dots, o\}, \\ x_{kp}^{\text{inf}} = \text{Min}_{s \in \{1, \dots, z\}} \{x_{sk} / y_{sj} \in C_{jp}\} \text{ and } x_{kp}^{\text{sup}} = \text{Sup}_{s \in \{1, \dots, z\}} \{x_{sk} / y_{sj} \in C_{jp}\} \\ \text{if } |I_{kp}| = 0, \begin{cases} va_p = \frac{1}{2} |R(x_k, y_j)| \times (R(x_k, y_j) + 1), \text{ if } x_{kp+1}^{\text{inf}} \geq x_{kp}^{\text{sup}} \\ va_p = \frac{1}{2} |R(x_k, y_j)| \times (1 - R(x_k, y_j)), \text{ if } x_{kp+1}^{\text{sup}} \leq x_{kp}^{\text{inf}} \end{cases} \\ \text{if } |I_{kp}| \neq 0, \begin{cases} va_p = \frac{1}{2} |R(x_k, y_j)| \times (R(x_k, y_j) + 1) \times \left(1 - \frac{|I_{kp}|}{|U_{kp}|}\right), \text{ if } x_{kp+1}^{\text{sup}} \geq x_{kp}^{\text{sup}} \\ va_p = \frac{1}{2} |R(x_k, y_j)| \times (1 - R(x_k, y_j)) \times \left(1 - \frac{|I_{kp}|}{|U_{kp}|}\right), \text{ if } x_{kp+1}^{\text{inf}} \leq x_{kp}^{\text{inf}} \end{cases} \end{array} \right.$$

$|I_{kp}|$ et $|U_{kp}|$ sont respectivement les longueurs des intervalles qui correspondent à l'intersection et à l'union générées par C_{jp} et C_{jp+1} (cf. Figure 21).

Structural parameters (Input space)	End-use functional properties (Output space)				
	y_1	...	y_l	...	y_n
x_l	$R(x_l, y_1)$	...	$R(x_l, y_l)$	...	$R(x_l, y_n)$
...
x_k	$R(x_k, y_1)$	...	$R(x_k, y_l)$	...	$R(x_k, y_n)$
...
x_m	$R(x_m, y_1)$	...	$R(x_m, y_l)$	...	$R(x_m, y_n)$
<i>no human knowledge: Empty cell</i>			<i>positive influence: $R(x_i, y_j) = +1$</i>		
<i>no influence: $R(x_i, y_j) = 0$</i>			<i>negative influence: $R(x_i, y_j) = -1$</i>		

Tableau 1 : formalisation de la connaissance humaine

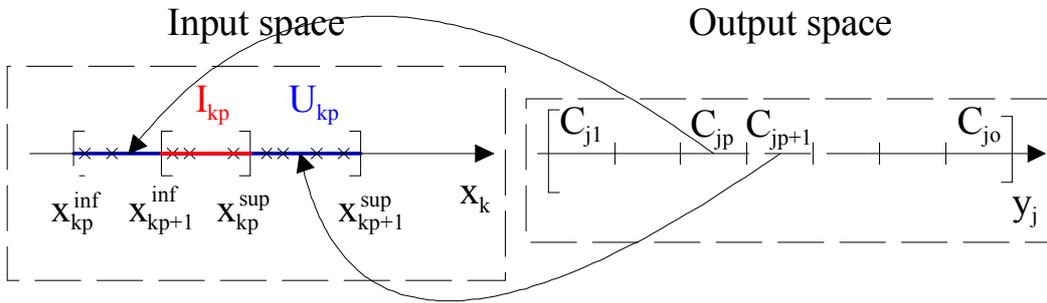


Figure 21 : détermination de l'intersection et de l'union entre les espaces d'entrée/sortie en dimension 1 pour le calcul du premier membre du critère C_k .

Afin de prendre en considération les interactions qui peuvent exister dans la combinaison de plusieurs entrées, nous proposons d'étendre la définition précédente du critère de pertinence à des dimensions supérieures. En effet, cette définition généralisée prendra toute son importance dans le choix judicieux des entrées pertinentes du modèle de corrélations en fonction de sa structure.

Nous introduisons l'ensemble Ω qui désigne une partition de l'espace des n entrées disponibles pour lesquelles nous nous proposons de déterminer le degré de pertinence. Le critère de pertinence généralisé avec cette nouvelle introduction s'écrit maintenant C_Ω .

$$C_\Omega = g_1 \cdot VA(\Omega, y_j) + g_2 \cdot S_\Omega$$

Le cardinal de l'ensemble Ω correspond à la dimension du sous-espace d'entrées que nous nous proposons d'évaluer, autrement dit le nombre d'entrées dont la combinaison conduit à un classement par ordre de pertinence. Pour mener à bien ce classement, $C_{\text{card}(\Omega)}^n$ combinaisons sont nécessaires. Le second membre S_Ω du critère généralisé C_Ω voit ainsi sa définition modifiée de la manière suivante :

$$S_\Omega = \frac{1 - \frac{2}{\pi} \cdot \tan^{-1} \left(\sum_{i \neq l}^z \frac{d(y_{ij}, y_{lj})}{d'_\Omega(X_i, X_l)} \right)}{2}$$

avec $d'_\Omega(X_i, X_l) = \sqrt{d^2(X_i, X_l) - d_\Omega^2(X_i, X_l)}$. Dans cette généralisation, $d_\Omega(X_i, X_l)$ correspond à la projection de $d(X_i, X_l)$ sur le sous-espace défini par les axes de la partition oméga.

De la même façon que nous avons adapté le second membre, il nous faut aussi modifier en conséquence le premier terme du critère qui prend en considération la connaissance humaine. L'univers de la sortie y_j est toujours divisé en o intervalles équivalents C_{jp} . Mais désormais, l'hyper-volume A_{Ω_p} est construit à partir de l'ensemble des données en entrée de ω qui induisent une sortie dans l'intervalle C_{jp} de y_j . I_{Ω_p} est généré par l'intersection des hyper-volumes A_{Ω_p} et $A_{\Omega_{p+1}}$ ($p \in \{1, \dots, o-1\}$) – cf. Figure 22.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \Omega = \bigcup_{h=1}^t \{x_{k(h)}\} \text{ with } (h, k(h)) \in \{1, \dots, t\} \times \{1, \dots, n\} \\
 VA(\Omega, y_j) = \frac{1}{(o-1)} \sum_{p=1}^{o-1} va_p \\
 p \in \{1, \dots, o\}, A_{\Omega_p} = \begin{bmatrix} x_{k(1)p}^{\text{inf}}, x_{k(1)p}^{\text{sup}} \\ \vdots \\ x_{k(h)p}^{\text{inf}}, x_{k(h)p}^{\text{sup}} \\ \vdots \\ x_{k(t)p}^{\text{inf}}, x_{k(t)p}^{\text{sup}} \end{bmatrix} \text{ and } p \in \{1, \dots, o-1\}, I_{\Omega_p} = A_{\Omega_p} \cap A_{\Omega_{p+1}} : \text{hyperboxes} \\
 h \in \{1, \dots, t\}, p \in \{1, \dots, o\}, \\
 x_{k(h)p}^{\text{inf}} = \text{Min}_{s \in \{1, \dots, z\}} \{x_{sk(h)} / y_{sj} \in C_{jp}\} \text{ and } x_{k(h)p}^{\text{sup}} = \text{Sup}_{s \in \{1, \dots, z\}} \{x_{sk(h)} / y_{sj} \in C_{jp}\} \\
 \text{if } |I_{k(h)p}| = 0, \begin{cases} va_{hp} = \frac{1}{2} |R(x_{k(h)}, y_j)| \times (R(x_{k(h)}, y_j) + 1), \text{ if } x_{k(h)p+1}^{\text{inf}} \geq x_{k(h)p}^{\text{sup}} \\ va_{hp} = \frac{1}{2} |R(x_{k(h)}, y_j)| \times (1 - R(x_{k(h)}, y_j)), \text{ if } x_{k(h)p+1}^{\text{sup}} \leq x_{k(h)p}^{\text{inf}} \end{cases} \\
 \text{if } |I_{k(h)p}| \neq \emptyset, \begin{cases} va_{hp} = \frac{1}{2} |R(x_{k(h)}, y_j)| \times (R(x_{k(h)}, y_j) + 1) \times \left(1 - \frac{|I_{k(h)p}|}{|U_{k(h)p}|}\right), \text{ if } x_{k(h)p+1}^{\text{sup}} \geq x_{k(h)p}^{\text{sup}} \\ va_{hp} = \frac{1}{2} |R(x_{k(h)}, y_j)| \times (1 - R(x_{k(h)}, y_j)) \times \left(1 - \frac{|I_{k(h)p}|}{|U_{k(h)p}|}\right), \text{ if } x_{k(h)p+1}^{\text{inf}} \leq x_{k(h)p}^{\text{inf}} \end{cases} \\
 \text{then } va_p = \frac{1}{t} \sum_{h=1}^t va_{hp}
 \end{array} \right.$$

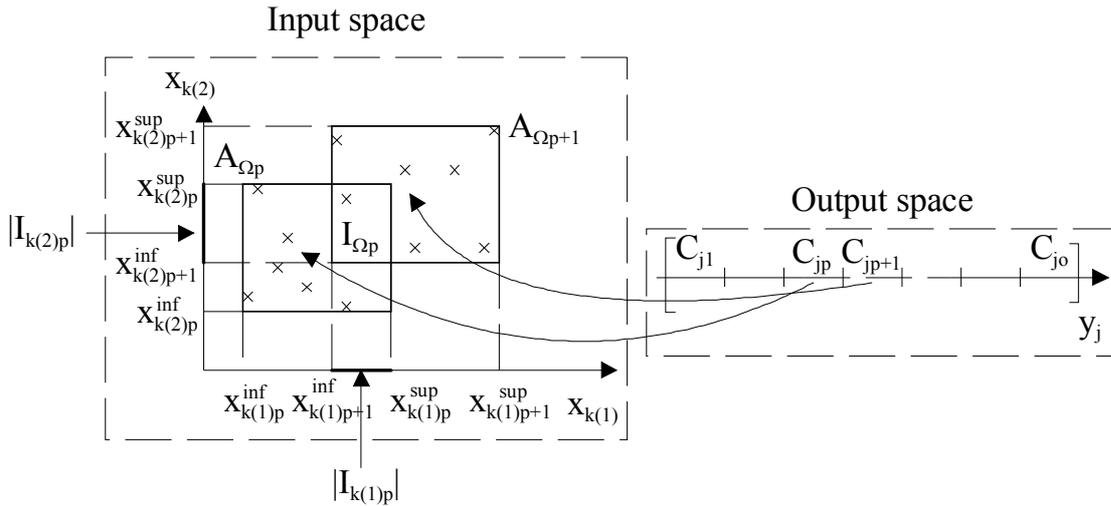


Figure 22 : détermination de l'intersection et de l'union entre les espaces d'entrées/sortie en dimension 2 pour le calcul de VA du critère $C_{\Omega - \Omega} = \{x_{k(1)}, x_{k(2)}\}$ et $\text{card}(\Omega)=2$.

Pour illustrer la méthode, nous avons calculé la valeur du critère de pertinence C_k en dimension 1 en affectant le même poids entre la connaissance humaine (VA) et la sensibilité des données mesurées sur les échantillons (S) (cf. Tableau 2). Cette application est illustrée pour une application dans le cadre des relations entre les paramètres structuraux de non-tissés et une propriété fonctionnelle comme le seuil de filtration qui détermine la taille de la plus petite sphère stoppée et filtrée par l'échantillon. Dans un premier temps, ce choix monodimensionnel est guidé par le souhait d'évaluer l'efficacité du critère à l'aide de notre connaissance a priori. Nous remarquons que dans un grand nombre de cas, les valeurs de VA sont égales à 1 (cf. Tableau 2). Ceci signifie que, sur la moitié des paramètres de structure, la connaissance humaine plus générale sur les non-tissés concorde parfaitement avec les valeurs mesurées sur la gamme d'échantillons plus spécifique. A l'aide du critère C_k , nous avons classé les paramètres de structure par ordre décroissant de pertinence par rapport au seuil de filtration des échantillons. Comme l'on pouvait s'y attendre, le volume total des pores disponible, la masse surfacique et la densité des fibres sont bien des facteurs qui influencent le seuil de filtration. Ce qui est intéressant dans cette approche, c'est d'observer que la seule observation de la sensibilité des données (S) n'est pas suffisante pour classer les paramètres pertinents. En effet, il faut introduire une connaissance plus générale sur les non-tissés, comme la connaissance humaine, pour améliorer le classement. A titre d'exemple, et en se basant uniquement sur les échantillons disponibles, on remarque que le premier critère serait le taux de liant dans le non-tissé (valeurs de S). Par l'adjonction d'une source d'information plus générale sur les non-tissés, la place dévolue au taux de liant (binder rate) prend la 8^{ième} place alors que le volume total des pores gagne la première. En général, il reste très difficile de valider ce classement obtenu a posteriori. Néanmoins, force est de constater que les valeurs relevées sur la simple base des échantillons sont insuffisantes et que l'ajout de la connaissance humaine, combinée à la base des échantillons, prend toute son importance et conduit à de meilleurs résultats. Dans la mesure où le critère de pertinence intègre la connaissance humaine, il est très difficile de le valider a posteriori. Dans chaque application, les méthodes utilisées ont été comparées et validées par une connaissance préalable des experts sur la technologie du procédé et sur la qualité du produit.

Partie 2 : Présentation des thèmes de recherche

Input	Human Knowledge			Data Sensitivity		Total Ranking	
	R	VA	Rank (VA)	S	Rank (S)	C	Rank (C)
Total pore volume	1	1.0000	1	0.0772	2	0.5386	1
Basis weight	-1	1.0000	1	0.0767	6	0.5383	2
Fibers surface density	-1	1.0000	1	0.0762	9	0.5381	3
Fibers volume density	-1	1.0000	1	0.0761	10	0.5380	4
Thickness	-1	1.0000	1	0.0747	12	0.5373	5
Fiber orientation	1	0.9692	6	0.0767	7	0.5229	6
Basis weight uniformity	1	0.9667	7	0.0765	8	0.5216	7
Binder rate	-1	0.5000	8	0.0773	1	0.2887	8
Projection ratio between MD and CD	1	0.5000	8	0.0768	4	0.2884	9
Projection ratio between princ.&min. axis	1	0.5000	8	0.0768	5	0.2884	10
Principal axis	1	0.2273	11	0.0760	11	0.1516	11
Variation coefficient	1	0.0000	12	0.0771	3	0.0386	12

Tableau 2 : classement des paramètres de structure pertinents pour une famille d'échantillons avec $(g_1, g_2) = (0.5, 0.5)$.

Toutefois, nous sommes conscients que la méthode de sélection que nous proposons pour le critère lié aux données mesurées (valeur de S) et par voie de conséquence sur la partie consacrée à la conformité avec la connaissance humaine, est très sensible aux données mesurées. Pratiquement, lorsque le critère de sélection pour deux variables sont proches l'un de l'autre, il est difficile de les hiérarchiser. C'est la raison pour laquelle nous avons proposé d'améliorer le critère de sélection proposé en le transformant en un critère linguistique basé sur la logique du flou. Cette transformation permet à la fois de filtrer efficacement le bruit sur les données mesurées et donc de rendre le critère plus robuste et, dans le même temps, d'obtenir un classement par ordre de pertinence plus significatif. Les deux hypothèses de départ concernant la définition de la sensibilité sont conservées :

- si une faible variation de la variable d'entrée correspond à une forte variation de la variable de sortie, alors cette variable d'entrée détient une forte valeur de sensibilité,
- si une forte variation de la variable d'entrée entraîne une faible variation de la variable de sortie, alors cette entrée détient une faible valeur de sensibilité.

Ces deux hypothèses peuvent être formulées sous forme de règles floues pour construire un modèle flou pour lequel les variations d'entrées et de sorties Δx et Δy sont cette fois-ci considérées comme deux variables d'entrée du modèle et la valeur de sensibilité S est désormais une sortie. Pour simplifier l'écriture, on note Δx et Δy les variations pour toutes les paires des m échantillons sans répétition.

Le modèle flou proposé pour l'estimation de la sensibilité inclut l'interface de fuzzification, la base de règle floue, le mécanisme d'inférence et l'interface de defuzzification. A la suite de la procédure de fuzzification, chacune des variables d'entrée est transformée en une variable floue à trois niveaux : grande, moyenne et faible. Chaque variable de sortie du modèle flou sont représentées par cinq sous-ensemble flous, respectivement : très faible (VS), faible(S), Moyen (M), Grand (B) et très grand (VB). Les fonctions d'appartenance des entrées-sorties du modèle sont représentées aux Figure 23 et Figure 24.

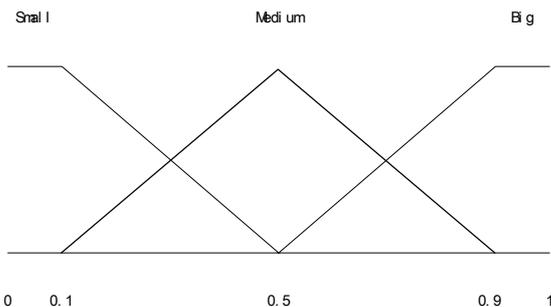


Figure 23 : Fonctions d'appartenance des entrées du modèle flou de sensibilité

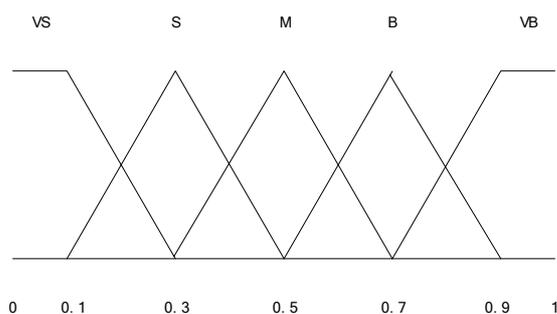


Figure 24 : Fonctions d'appartenance des sorties du modèle flou de sensibilité

Neuf règles floues sont construites à partir de l'expérience humaine recueillie sur les sensibilités en fonction des variations des variables d'entrée et de sortie :

- Si Δx est faible et Δy est faible alors la sensibilité S est faible
- Si Δx est faible et Δy est moyenne alors la sensibilité S est grande
- Si Δx est faible et Δy est grande alors la sensibilité S est très grande
- Si Δx est moyenne et Δy est faible alors la sensibilité S est faible
- Si Δx est moyenne et Δy est moyenne alors la sensibilité S est moyenne
- Si Δx est moyenne et Δy est grande alors la sensibilité S est grande
- Si Δx est forte et Δy est faible alors la sensibilité S est très faible
- Si Δx est forte et Δy est moyenne alors la sensibilité S est faible
- Si Δx est forte et Δy est forte alors la sensibilité S est moyenne

La première règle est ajoutée pour limiter les effets pervers liés aux bruits à la fois sur les données mesurées à l'entrée du système et sur les données mesurées à la sortie du système. La méthode de defuzzification de Mamdani [MAM-75] est employée et conduit à l'estimation de la valeur de sensibilité $S = FL(\Delta x, \Delta y)$. De la même façon, il est aisé d'obtenir la valeur correspondante de la sensibilité lorsque l'on procède au retrait d'une variable x_k , à savoir : $S_k = FL(\Delta x^k, \Delta y)$. Plus la valeur de S_k est grande, plus la variable correspondante x_k est pertinente. Ce nouveau critère de sensibilité plus robuste peut alors être combiné avec le membre VA pour fournir un critère complet incluant la connaissance humaine pour le classement par ordre de pertinence des variables d'entrée par rapport à chacune des variables de sortie. La robustesse de ce critère a été étudiée en utilisant des fonctions hautement non-linéaires et en ajoutant du bruit. Les résultats montrent l'indéniable supériorité de ce critère amélioré [C36].

2.2.3 Modélisation de systèmes complexes par les techniques floues

Les systèmes sont souvent classés en deux types : le type boîte blanche et le type boîte noire [NAJ-89]. Les systèmes du premier type sont modélisés à partir de lois physico-chimiques. La structure et les paramètres des modèles correspondants se prêtent donc facilement à des interprétations physiques. Les systèmes du deuxième type sont modélisés puis identifiés directement à partir de données expérimentales. Le principe de la boîte noire permet d'étudier le passage observé entre les variables d'entrée et de sortie sans prendre en compte les mécanismes internes qui réalisent cette transition. Entre les deux types précédents existent des systèmes intermédiaires du type boîte grise. La connaissance physique de ces systèmes peut être prise en compte pour la modélisation. Toutefois, cette connaissance étant insuffisante, la modélisation doit être complétée en incluant également les informations extraites directement à partir des données.

Un système du type boîte noire ou boîte grise peut être considéré comme un système complexe dont le comportement est déterminé par l'interaction d'un grand nombre d'éléments. Un système complexe comprend une quantité importante d'incertitudes et d'imprécisions, se traduisant par les aspects suivants :

- la relation entre les variables d'entrée et les variables de sortie est difficilement modélisable par des équations mathématiques simples,
- il est difficile d'extraire, à partir d'un grand nombre de mesures sur le système, les informations les plus pertinentes caractérisant le comportement du système,
- certaines variables du système sont difficilement mesurables car elles comprennent des informations incertaines et imprécises (par exemple des expressions linguistiques),
- il existe des variables d'entrée incontrôlables représentant des bruits et des perturbations,
- il est difficile de régler les variables d'entrée pour obtenir une performance optimale du système,
- il est difficile de suivre l'évolution du comportement dynamique.

Dans notre approche, nous avons privilégié les techniques floues. Introduite par Lotfi A. ZADEH en 1965 [ZAD-65] et appliquée depuis 1975 aux systèmes de réglage, la théorie des ensembles flous part du constat que dans le monde physique, on peut rencontrer des objets qui ne présentent pas des définitions précises de leurs critères d'appartenance à une classe particulière. ZADEH a éprouvé le besoin de formaliser la représentation et le traitement de connaissances imprécises ou approximatives, afin de pouvoir traiter des systèmes d'une grande complexité. A partir de cette théorie sur les ensembles flous, on peut introduire des variables linguistiques qui servent à modéliser les connaissances vagues [BOU-95]. L'outil mathématique simple qui peut être proposé consiste à mettre un place une partition floue de l'espace des entrées et pour chacun de ces sous-espace flou, on forme une relation linéaire entre les entrées et les sorties. Chacune des sorties pouvant être traitée séparément, nous pouvons considérer que le modèle flou proposé est multi-entrées/une sortie (MISO : Multi-Inputs/Single Output). Les contrôleurs en logique floue (dénommé F.L.C pour Fuzzy Logic Controller) sont composés d'une base de règles floues, d'une interface de fuzzification, d'un mécanisme d'inférence flou et d'une interface de defuzzification. Les modèles flous proposés par TAKAGI et SUGENO [TAK-85] consistent à la combinaison de plusieurs sous-modèles linéaires dont les sorties sont pondérées en accord avec des règles floues de façon à représenter le comportement des entrées/sorties d'un système non-linéaire. Dès lors chaque règle peut être considérée comme la définition d'un modèle "local". La modélisation par la logique floue est particulièrement intéressante, car il a été montré que les contrôleurs en logique floue sont des estimateurs universels [WAN-92][CAS-95]. C'est à dire qu'ils sont capables d'approcher, à une valeur ε -près choisie, toute fonction réelle définie continue sur un compact et ceci avec des hypothèses peu restrictives telles que :

- des fonctions membres de formes gaussiennes, triangulaires, trapézoïdales,
- un mécanisme d'inférence qui pour passer d'une règle composée de plusieurs prémisses et d'une conclusion à une règle simple résultante composée d'une prémisse et de la même conclusion utilise une t-norme.

Les F.L.C. ne peuvent être utilisés que dans les systèmes supervisés. Le F.L.C. développé par TAKAGI et SUGENO permet de caractériser la relation entre les variables floues (d'entrée) et les variables numériques (de sortie) du système [TAK-85]. Il peut être établi à partir des données numériques mesurées sur l'entrée et la sortie. A part le modèle TAKAGI-SUGENO, il existe aussi d'autres méthodes permettant d'extraire des règles floues directement à partir des données numériques [TON-80], [WAN-92]. La plupart des F.L.C. de ce type sont établis sous l'hypothèse que la partition de l'espace de variables d'entrée est déjà connue. Dans une telle situation, une règle floue est générée pour chaque région partitionnée. Pourtant, dans la

pratique, nous ignorons souvent cette partition et différentes partitions de l'espace d'entrée conduisent à des résultats variés du modèle flou. Des erreurs importantes peuvent apparaître à la sortie du modèle flou si la partition correspondante est incorrecte. Il existe donc une partition optimale de l'espace d'entrée minimisant la différence entre la sortie du modèle et la sortie réelle du système étudié. Dans nos projets de recherche, nous avons appliqué la méthode de ABE [ABE-95] afin de modéliser des correspondances entre les espaces d'entrée et de sortie. Cette méthode, basée sur la construction d'hyper-volumes permet d'obtenir une partition plus précise de l'espace d'entrée (Section 2.2.3.1) conduisant à des règles floues plus concises et plus interprétables. Il existe également d'autres modèles flous récemment développés permettant d'intégrer les techniques floues, les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques. Le résumé de ces travaux se trouve dans [TAK-97]. Mais en règle générale, un modèle flou bien adapté doit satisfaire les trois critères suivants :

- précision : sur l'ensemble des données de test, il est capable de générer à sa sortie des valeurs proches de la sortie réelle du système,
- rapidité : il doit être rapidement établi à partir des données d'apprentissage,
- interprétation physique : la structure du modèle flou doit être facilement interprétée en utilisant la connaissance spécialisée sur l'aspect physique du système.

L'étude des systèmes est très importante. En effet, un procédé industriel peut être considéré comme un système complexe qui met en relations des variables d'entrées mesurées sur le procédé et des variables de sortie [C7][C8]. La mise en place de systèmes a jalonné nos travaux au travers des deux thématiques. Nous avons travaillé sur les modèles de corrélations pour analyser les liaisons entre les paramètres de structure des matériaux et les propriétés attendues sur ces matériaux, mais aussi pour estimer le plus précisément possible la dimension fractale de séries temporelles ou encore pour lier des variables subjectives à des données mesurées sur les produits en analyse sensorielle. Les modèles de corrélations sur lesquels nous nous sommes penchés se situent ainsi à la croisée de nos deux thématiques et nous avons cherché soit à optimiser leurs paramètres internes, soit à simplifier leur structure pour les rendre plus lisible et par la même conduire à meilleure compréhension des relations en jeu et au final à aider à la conception de matériaux textiles. Nous avons fait appel à ces méthodes pour proposer une estimateur précis de la dimension fractale (Contrôleur en Logique Floue de la Figure 7), pour mettre en liaison les paramètres de structure des matériaux non-tissés avec leurs propriétés fonctionnelles ou encore pour construire des modèles de corrélations entre les données subjectives issues de panels d'experts et les paramètres de mesures physiques sur les étoffes ou les paramètres de procédé de transformation.

2.2.3.1 CONSTRUCTION D'UN MODELE FLOU DE TYPE ABE

Cette méthode a été développée sous l'hypothèse que les données d'apprentissage sont déjà affectées aux m classes préalablement définies. C'est donc une méthode supervisée.

Le domaine de y est partitionné en m sous-intervalles :

$$C_1 = [y_0, y_1]: y_0 \leq y \leq y_1,$$

$$C_2 = (y_1, y_2]: y_1 < y \leq y_2,$$

.....

$$C_m = (y_{m-1}, y_m]: y_{m-1} < y \leq y_m.$$

Tout d'abord, dans l'espace des variables caractéristiques de dimension n (d'entrée ou de sortie du système), nous construisons, a priori, un ensemble d'hyper-volumes, définis de la façon suivante (cf. Figure 25) :

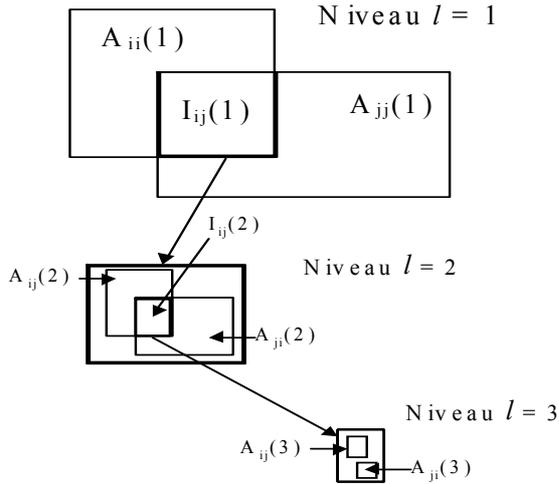


Figure 25 : Définition récursive des hyper-volumes d'activation et d'inhibition

Pour la classe i , l'hyper-volume d'activation du niveau l , notée $A_{ii}(l)$, est défini par :

$$A_{ii}(l) = \{X \mid v_{iik}(l) \leq x_k \leq V_{iik}(l)\}$$

où x_k est la $k^{\text{ème}}$ composante du vecteur X , $v_{iik}(l)$ et $V_{iik}(l)$ constituent les bornes respectivement inférieure et supérieure de x_k pour les X appartenant à la classe i .

S'il existe des intersections entre différents hyper-volumes d'activation, nous les résolvons de manière récursive, selon la procédure suivante. La région d'intersection entre $A_{ii}(l)$ et $A_{jj}(l)$ est définie comme hyper-volume d'inhibition de niveau l , noté $I_{ij}(l)$, soit : $I_{ij}(l) = A_{ii}(l) \cap A_{jj}(l)$.

En notant $w_{ijk}(l)$ et $W_{ijk}(l)$ les bornes inférieure et supérieure de I_{ij} sur l'axe x_k , nous avons $v_{iik}(l) \leq w_{ijk}(l) \leq W_{ijk}(l) \leq V_{iik}(l)$.

Si des données appartenant à la classe i existent dans $I_{ij}(l)$, l'hyper-volume d'activation de niveau 2 $A_{ij}(2)$ est défini au sein de $I_{ij}(l)$. Cette procédure se répète jusqu'à la résolution de toutes les intersections.

L'espace des attributs dont la partition est définie par les sous-espaces flous $A_{ij}(l)$ et $I_{ij}(l)$, nous permet d'énoncer les règles floues $R_{ij}(l)$ de niveau l : $R_{ij}(l)$:

Si $X \in A_{ij}(l)$ ET $X \notin I_{ij}(l)$ ALORS $y \in C_i$

Des fonctions membres doivent être associées à chacun des sous-espaces de l'espace des attributs. Nous définissons les fonctions membres de telle façon que la valeur du degré d'appartenance du vecteur X présenté en entrée du F.L.C soit maximum (proche de 1) lorsque X se situe à l'intérieur des frontières des hyper-volumes d'activation et d'inhibition et qu'elle décroisse en s'éloignant des frontières.

Nous nommerons $m_Z(x_k, \gamma_k)$, le degré d'appartenance en accord avec la fonction membre de la variable x_k pour le sous-espace flou Z .

Si $Z = A_{ij}(l)$, $u_k = v_{ijk}(l)$ et $U_k = V_{ijk}(l)$

et si $Z = I_{ij}(l)$, $u_k = w_{ijk}(l)$ et $U_k = W_{ijk}(l)$

Les fonctions membres sont paramétrées et les hyper-volumes d'activation et d'inhibition auront la même forme (trapézoïdale ou gaussienne) mais différeront par le choix de leur paramètres. Finalement le degré d'appartenance du vecteur d'entrée X à l'ensemble Z se définit par :

$$X \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \in Z, m_Z(X) = \min_{k \in \{1, \dots, n\}} m_Z(x_k, \gamma_k)$$

$$(i, j) \in \{0, 1, \dots, m\}^2, Z = \{A_{ij}(l), I_{ij}(l)\}$$

- fonction membre trapézoïdale symétrique (Figure 26)

La forme de cette fonction membre est représentée à la Figure 26. Les pentes de part et d'autre des bornes de l'hyper-volume pour la variable k ($k \in \{1, 2, \dots, n\}$) sont symétriques et sont égales à γ qui est un paramètre de sensibilité. Plus la pente sera grande, plus la frontière sera abrupte et l'on tend vers une appartenance de la variable x_k à l'ensemble Z au sens usuel du terme mathématique (0 ou 1). Si la pente devient trop faible, elle tend à recouvrir le noyau d'un autre ensemble Z' flou et donc à perdre en précision. Pour une variable x_k et une fonction trapézoïdale symétrique, le degré d'appartenance de la variable x_k à l'ensemble flou Z s'exprime par :

$$m_Z(x_k, \gamma_k) = \begin{cases} 1 & x_k \in [u_k, U_k] \\ 1 - \max(0, \min(1, \gamma_k(u_k - x_k))) & x_k < u_k \\ 1 - \max(0, \min(1, \gamma_k(x_k - U_k))) & x_k > U_k \end{cases} \text{ avec } \forall k \in \{1, \dots, n\}, \gamma_k \neq 0$$

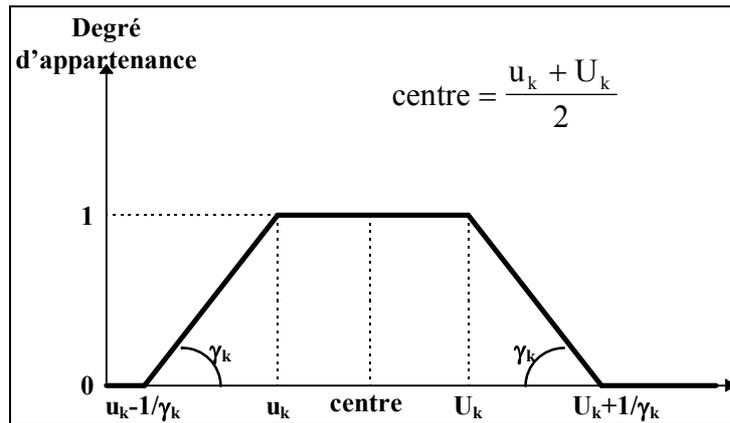


Figure 26 : fonction membre trapézoïdale symétrique

- fonction membre trapézoïdale asymétrique (Figure 27)

Cette forme de fonction membre se rapproche de la fonction trapézoïdale symétrique excepté le fait que les pentes de part et d'autre sont distinctes. Elle possède donc deux paramètres γ et γ' . Elle s'exprime de la façon suivante :

$$m_Z(x_k, \gamma_k, \gamma'_k) = \begin{cases} 1 & x_k \in [u_k, U_k] \\ 1 - \max(0, \min(1, \gamma_k(u_k - x_k))) & x_k < u_k \\ 1 - \max(0, \min(1, \gamma'_k(x_k - U_k))) & x_k > U_k \end{cases} \text{ avec } \forall k \in \{1, \dots, n\}, \gamma_k \neq 0$$

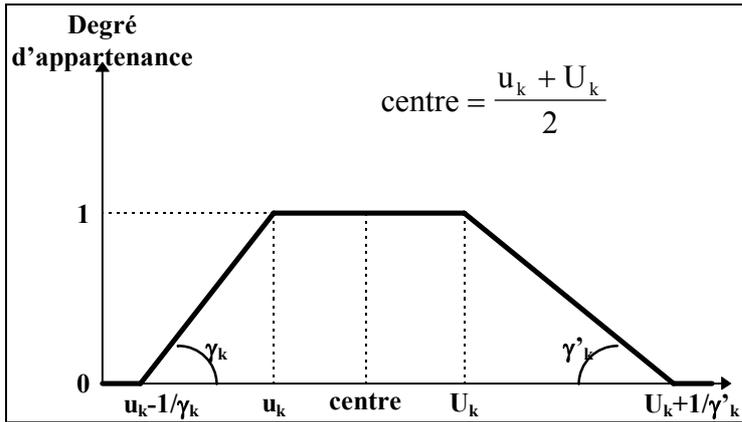


Figure 27 : fonction membre trapézoïdale asymétrique

- fonction membre gaussienne (Figure 28)

Cette fonction présente l'avantage de ne jamais s'annuler et par conséquent de prendre en considération tous les points de l'espace. La valeur maximale 1 est atteinte au centre de la région et les points d'inflexion de la courbe sont positionnés par rapport à la taille de l'hyper-volume avec un paramètre de sensibilité γ . Elle est définie par :

$$m_z(x_k, \gamma_k) = \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{(x_k - \text{centre})^2}{\gamma_k^2}\right) \quad (2-1)$$

$$\text{centre} = \frac{u_k + U_k}{2}$$

avec $\forall k \in \{1, \dots, n\}, \gamma_k \neq 0$

Pour une forte valeur du paramètre γ , les noyaux des fonctions membres auront tendance à se être recouverts et donc la partition de l'espace s'estompe. Inversement, pour une faible valeur du paramètre, on se rapproche de la définition usuelle d'appartenance au sens mathématique.

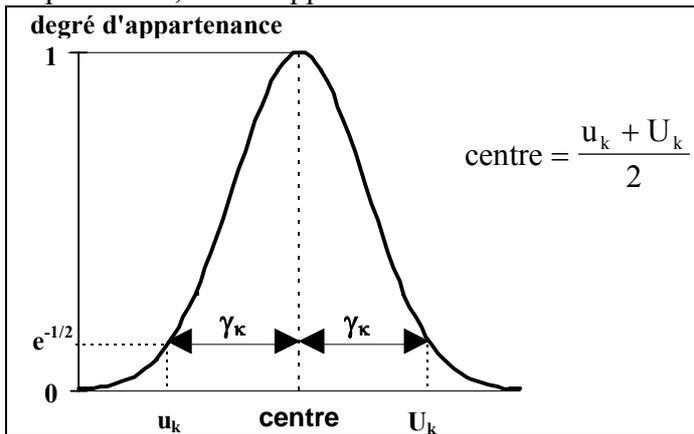


Figure 28 : fonction membre gaussienne pour le cas particulier $\gamma_k = \frac{U_k - u_k}{2}$

Dans le mécanisme d'inférence flou, les expressions des règles floues de niveau l comportent des prémisses combinées entre elles par des ET logique (nous devons utiliser des t-normes pour nous assurer de définir un estimateur universel). Par conséquent, le degré d'appartenance $d_{Rij(l)}(X)$ d'une règle floue pour une entrée X est donné par : $d_{Rij(l)}(X) = \max(0, m_{Aij(l)}(X) - m_{Iij(l)}(X))$.

Nous prenons le maximum avec la valeur 0 de façon à être sur d'obtenir une valeur qui ne pourra pas être négative. Finalement, le degré d'appartenance final d'un vecteur X à un ensemble de règle floues $\{l \in \{1, \dots, L\}, R_{ij}(l)\}$ pour tous les niveaux l s'exprime par :

$$d_{R_{ij}}(X) = \max_{l \in \{1, \dots, L\}} (d_{R_{ij}(l)}(X))$$

Nous prenons le maximum car il s'agit d'une réunion. En effet si l'hyper-volume d'activation $A_{ij}(l+1)$ existe, il est inclus dans l'hyper-volume d'inhibition $I_{ij}(l)$. Les règles de niveaux l sont combinées entre elles par des OU. Maintenant le degré d'appartenance $d_i(X)$ d'un vecteur X donné entraînant une sortie dans la classe i est :

$$d_i(X) = \min_{\substack{i \neq j \\ A_{ij}(l) \cap A_{jj}(l) \neq \emptyset}} (d_{R_{ij}}(X))$$

L'opérateur minimum nous permet de nous assurer que si la classe de sortie i entraîne au niveau des régions de l'espace des attributs plus d'un chevauchement avec plus d'une autre classe en sortie, les conflits sont réglés indépendamment. En effet, si $d_{R_{ij}}(X)=1$ et $d_{R_{ik}}(X)=0$, cela signifie que X appartient à l'hyper-volume d'inhibition définie par les classes i et k et que de toute façon il ne doit pas être assigné à la sortie de classe i . Le mécanisme d'inférence flou résultant est représenté à la Figure 29.

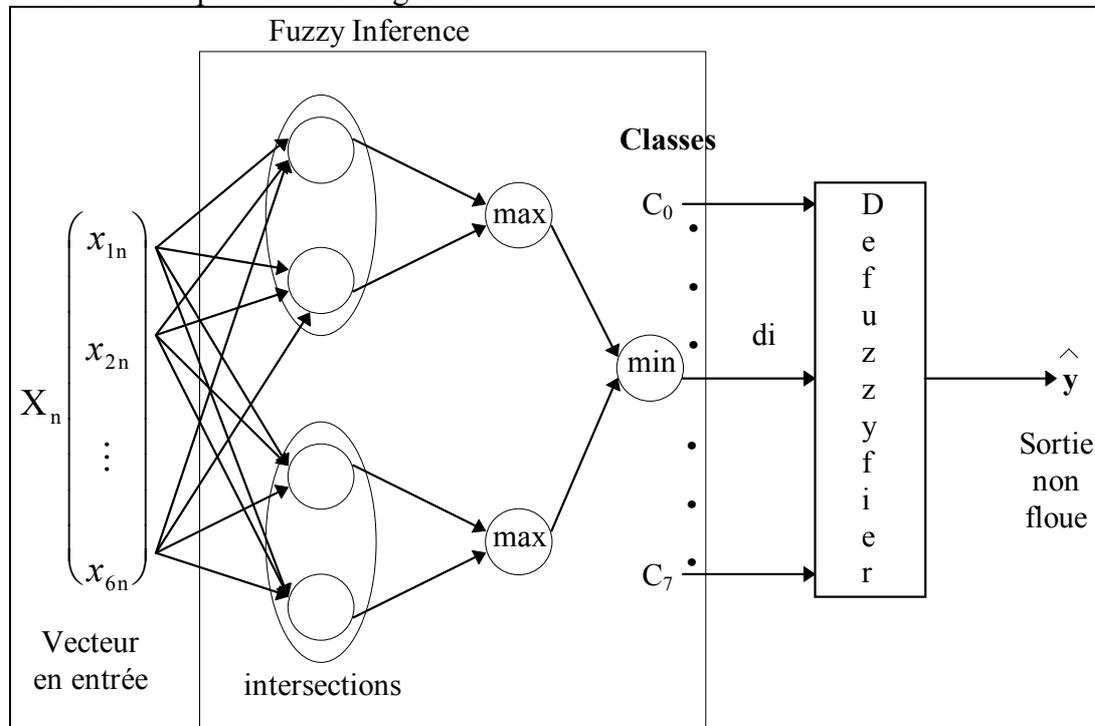


Figure 29 : mécanisme d'inférence flou

Afin de passer d'une valeur floue de la sortie à une valeur non-floue (interface de defuzzification), la méthode la plus souvent utilisée est basée sur le centre de gravité :

$$\hat{y} = \frac{\int d_i(X) \cdot y \cdot dy}{\int d_i(X) \cdot dy}$$

une bonne méthode pour approcher le centre de gravité, lorsque la sortie y est comprise dans des classes C_i ($i \in \{0, \dots, m\}$) définie par un intervalle $C_i = [C_{i\min}, C_{i\max}]$, est de considérer le centre de classe m_i et sa variance σ_i et de calculer

$$\hat{y} = \frac{\sum_{i=0}^m d_i(X) \cdot m_i \cdot \sigma_i}{\sum_{i=0}^m d_i(x) \cdot \sigma_i}$$

$$m_i = \frac{C_{\text{imin}} + C_{\text{imax}}}{2}$$

$$\sigma_i = \frac{C_{\text{imax}} - C_{\text{imin}}}{2}$$

\hat{y} est la sortie non floue du Contrôleur.

2.2.3.2 OPTIMISATION DE LA STRUCTURE ET DES PARAMETRES INTERNES D'UN MODELE FLOU

Ces travaux sur l'optimisation de la structure et les paramètres internes du modèle flou de type ABE ont été publiés dans [P2] et sont issus de mes travaux de thèse.

La génération des règles floues, telle qu'elle a été définie à la section 2.2.3.1, nous assure de l'absence de redondance des règles. En effet la partition en régions floues de l'espace des entrées est réalisée de façon à ce qu'il n'y ait pas de recouvrement (élimination des intersections). Toutefois, la méthode ne nous garantit pas de la complexité du modèle flou et par conséquent de la lisibilité des relations construites. La complexité du modèle croît exponentiellement avec le nombre des entrées. Afin de réduire le nombre des entrées et par la suite la complexité du modèle, nous avons défini un critère qui nous permet de ne conserver que les variables d'entrée les plus pertinentes dans le cas d'un système supervisé (cf section 2.2.2). Les entrées redondantes ou non pertinentes étant éliminées, afin de réduire la complexité du Contrôleur en Logique Floue multi-entrées nous amène à décomposer le modèle flou en un ensemble de contrôleurs plus simples reliés entre eux par une structure hiérarchique. En fait, la procédure de l'extraction des règles floues peut être considérée comme un problème de classification. Ainsi, dans notre décomposition du modèle flou, les couches intermédiaires sont définies comme les résultats intermédiaires de la classification. La construction d'une structure hiérarchique est rendue difficile, car il faut une connaissance des relations entre les variables en entrée. Aussi la structure doit être déterminé par l'opérateur lorsque ces relations sont inconnues.

2.2.3.2.1 Construction d'une structure hiérarchique en série de F.L.C

La procédure de décomposition hiérarchique transforme le Contrôleur en Logique floue définit précédemment avec sa structure complexe en une série de contrôleurs plus simple. Chacun d'entre eux ne possède pas plus de deux entrées et par conséquent un nombre de règles bien inférieur. A la différence du F.L.C définit avec ses nombreuses entrées et une sortie formée de m classes distinctes, un contrôleur décomposé ne générera qu'une partition en deux classes sur son intervalle de sortie. Donc au plus, $m-1$ contrôleurs seront nécessaires pour remplir la fonction du contrôleur original (Figure 30). En général il existe une perte de précision dans la structure décomposée en raison de la disparition des interconnexions entre les variables d'entrées. C'est la raison pour laquelle la structure doit être construite en s'assurant que cette perte soit minimale.

Considérons un espace des entrées de dimension topologique n . L'ensemble $\{x_1, \dots, x_n\}$ constitue l'ensemble des variables en entrée. La sortie finale de la structure est subdivisée en m classes constituant la méta-classe $MC_1 = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$. La construction de la structure s'opère suivant les cinq étapes suivantes :

- Etape 1 Initialisation
 $k = 1$
 la partition P_1 est égale à $\{MC_1\}$
 avec $MC_1 = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$
- Etape 2 Sélection d'une variable d'entrée z_1 ($z_1 \in \{x_1, \dots, x_n\}$) et de la sortie z_2 du $(k-1)^{ième}$ F.L.C.
 Sélection d'un méta-classe MC_i ($i \in \{1, \dots, k\}$) de la partition courante $P_k = \{MC_1, \dots, MC_k\}$.
 Divisions de MC_i en deux nouvelles sous-méta-classes Q_1 and Q_2 de telle façon que :
 :
 $MC_i = Q_1 \cup Q_2$,
 $Q_1 \cap Q_2 = \emptyset$,
 la perte d'information (z_1, MC_i, Q_1, Q_2) soit minimale.
- Etape 3 Génération des règles floues à partir de la base d'apprentissage pour le $k^{ième}$ F.L.C. pour lequel les variables d'entrées deviennent z_1 et z_2 et la sortie correspond aux classes définies par Q_1 et Q_2 .
- Etape 4 La méta-classe MC_i devient Q_1 et on crée la méta-classe MC_{k+1} correspondant à Q_2 .
 Incrémentement de k d'une unité.
- Etape 5 Arrêt de la procédure si $P_k = \bigcup_{p \in \{1, \dots, m\}} \{C_p\}$
 sinon, retour à l'Etape 2.

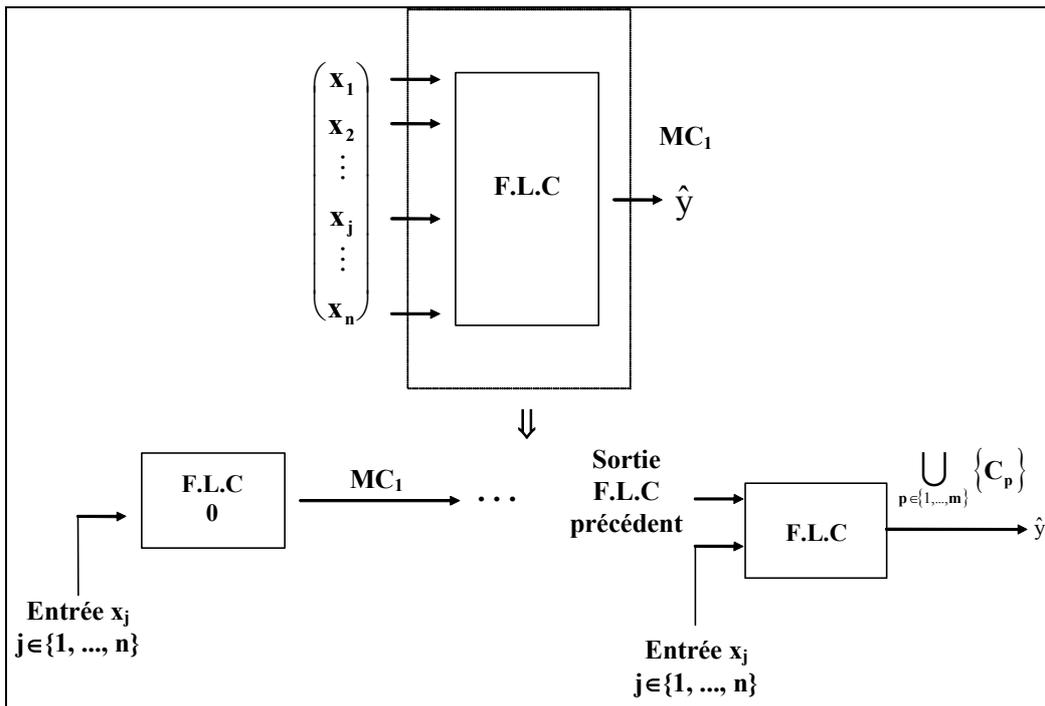


Figure 30 : décomposition du modèle flou en structure hiérarchique

Au niveau de la seconde étape, la sélection d'une variable d'entrée optimale, de sorte que la perte d'informations dans le contrôleur soit minimale, s'effectue par algorithme génétique. Etant donné une variable d'entrée candidate x_j , la division en deux sous-méta-classes Q_1 et Q_2 correspond à une partition de l'espace mono-dimensionnel associé à la variable x_j en deux intervalles I_1 et I_2 . Les bornes de l'intervalle I_1 et I_2 correspondent respectivement aux valeurs minimale et maximale de la variable x_j pour les classes appartenant à Q_1 et Q_2 . La perte d'information correspond à l'intersection de ces deux intervalles (Figure 31).

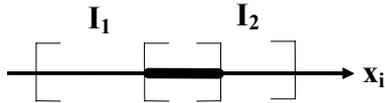


Figure 31 : partition de l'espace mono-dimensionnel de la variable d'entrée x_i

$$t \in \{1, \dots, N\}, X_t \begin{pmatrix} x_{1t} \\ \vdots \\ x_{nt} \end{pmatrix} \in \Omega,$$

pour les X_t associés aux classes de sortie de la partition Q_1 ,

$$I_1 = \left[\min_{t \in \{1, \dots, N\}} x_{jt}, \quad \max_{t \in \{1, \dots, N\}} x_{jt} \right]$$

pour les X_t associés aux classes de de sortie de la partition Q_2 ,

$$I_2 = \left[\min_{t \in \{1, \dots, N\}} x_{jt}, \quad \max_{t \in \{1, \dots, N\}} x_{jt} \right]$$

La détermination de la meilleure partition est réalisée par algorithme génétique. Le codage de la partition en cours MC_i correspond à un codage binaire dont la longueur est déterminée par le nombre total de classes l_i ($l_i \leq m$) comprises dans la partition et la fonction d'évaluation à la longueur minimale de l'intervalle de l'intersection $I_1 \cap I_2$ pour la variable x_j donnée.

Pour chacune des variables d'entrée x_j et des partitions MC_i , l'algorithme génétique retournera le chromosome qui décodé explicitera la meilleure partition de MC_i pour chacune des variables. Par la suite, il suffit de choisir le minimum des fonctions d'évaluations pour déterminer l'entrée z_1 candidate au $k^{\text{ième}}$ F.L.C. et les méta-classes MC_i et MC_{k+1} .

Calqué sur la structure hiérarchique à une entrée définie au paragraphe précédent et avec la même définition des espaces d'entrée et de sortie, il est possible d'envisager une ou plusieurs entrées supplémentaires pour chacun des Contrôleurs en Logique Floue décomposé. La considération d'une entrée supplémentaire nous permet de réduire la perte d'information au niveau de la décomposition du F.L.C à n entrées. Les étapes de la construction des F.L.C décomposés à deux ou plusieurs entrées sont semblables à celles décrites pour des F.L.C à une entrée. La différence se situe au niveau de la fonction d'évaluation à minimiser. Au niveau de la seconde étape, la sélection se porte sur deux ou plusieurs variables d'entrée optimale, de sorte que la perte d'informations dans le contrôleur soit minimale. L'optimisation est toujours menée par algorithme génétique. A titre d'exemple, la construction d'une structure hiérarchique à deux entrées x_j et $x_{j'}$ ($(x_j, x_{j'}) \in \{x_1, \dots, x_n\}^2$) du F.L.C décomposé, la division en deux sous-méta-classes Q_1 et Q_2 correspondra cette fois-ci à une partition de l'espace bi-dimensionnel associé aux variables x_j et $x_{j'}$ en deux rectangles I_1 et I_2 . Les frontières des rectangles I_1 et I_2 correspondent respectivement aux valeurs minimale et maximale des variables x_j et $x_{j'}$ pour les classes appartenant à Q_1 et Q_2 . La perte d'information correspondant maintenant à l'aire de l'intersection $I_1 \cap I_2$.

2.2.3.2.2 Optimisation des fonctions membres

Pour que les Contrôleurs en Logique floue restent des estimateurs universels, une condition porte sur les fonctions membres associées à chacun des sous-espaces flous générés par les règles floues. Les formes trapézoïdales ou gaussiennes, entre autre, remplissent la condition nécessaire à cette universalité. L'optimisation pour chacun des F.L.C, unique ou décomposés en structure hiérarchique, des fonctions membres se situe à deux niveaux. La première optimisation se situe au niveau des paramètres internes de la fonction membre : largeur de l'intervalle sur lequel la fonction décroît de la valeur 1 vers 0 et le centre du noyau. La

seconde optimisation correspond au choix le mieux adapté de la forme de la fonction membre : les formes retenues seront trapézoïdales symétriques ou gaussiennes.

Les équations des fonctions membres ont été explicitées à la section 2.2.3.1. Le centre des noyaux est imposé par la génération des règles floues. Il correspond systématiquement au milieu du sous-espace flou. La taille du noyau est fixe pour les fonctions trapézoïdales et il correspond à l'intervalle $[u_k, U_k]$. En ce qui concerne les fonctions de forme gaussienne, le noyau est réduit à un point : le centre du noyau. Afin de faciliter la recherche de la largeur optimale sur laquelle se réalise la décroissance des fonctions membres, nous avons fait le choix de formes symétriques dépendantes de l'unique paramètre γ . L'optimisation de ce dernier, pour chacune des fonctions membres trapézoïdale symétrique et gaussienne, s'effectue par algorithme génétique. La largeur ($1/\gamma$ pour les fonctions trapézoïdales et γ pour les fonctions de type gaussienne) de la décroissance est réglée en fonction des bornes du sous-ensemble flou. Elle varie dans un intervalle délimité par la taille maximum de l'intervalle définit par les frontières des hyper-volumes d'activation et d'inhibition pour chacune des entrées x_k . La fonction d'évaluation de l'algorithme génétique à minimiser, retenue pour l'optimisation des paramètres de sensibilité des fonctions membres, correspond à l'erreur commise entre la sortie finale \hat{y} du contrôleur muni de ses fonctions membres et la sortie désirée à partir des vecteurs d'entrée de la base de connaissance.

Qu'il s'agisse de l'unique contrôleur ou de sa décomposition en série de contrôleurs, chacun d'entre eux est muni de ses propres formes de fonctions membres (trapézoïdales symétriques ou gaussiennes) avec pour l'ensemble de ses fonctions une sensibilité optimale. La décision de choisir l'une plutôt que l'autre forme de fonctions membres est incertaine. On peut définir le système que nous nous proposons d'ajuster (Figure 32). Ce dernier est muni d'un contrôleur (pour la décomposition l'opération sera répétée à l'identique pour tous les contrôleurs) constitué de sa base de règles floues fixe et de ses fonctions membres dont la sensibilité est optimisée. Les entrées de notre système seront les formes de ses fonctions membres (trapézoïdales symétriques ou gaussiennes). La sortie de notre système sera la somme des erreurs systématiques commises en distance d_1 à partir de la base d'apprentissage Ω .

On peut considérer que le système définit ci-dessus est plongé dans un environnement inconnu mais par l'intermédiaire de la base de connaissances Ω , nous disposons d'informations pour extraire ses propriétés. De plus, il satisfait les hypothèses suivantes :

- il peut être contrôlé : les états du système peuvent être ajustés par une action sur son entrée,
- il est observable : la sortie du système est sensible aux variations de l'entrée,
- sa sortie est invariante si son entrée reste inchangée.

Notre but est de minimiser la sortie du système (erreur). Afin de déterminer quel est le meilleur choix pour chaque F.L.C entre des fonctions membres trapézoïdales symétriques ou gaussiennes, nous avons proposé de mettre en place un automate stochastique avec une rétropropagation : un automate d'apprentissage. Les automates d'apprentissage ont été étudiés par TSETLIN [TSE-61]. Un algorithme plus robuste est proposé par ZENG [ZEN-00b] et c'est ce dernier qui a été appliqué pour permettre une optimisation complète des paramètres internes des F.L.C conduisant à une erreur minimale.

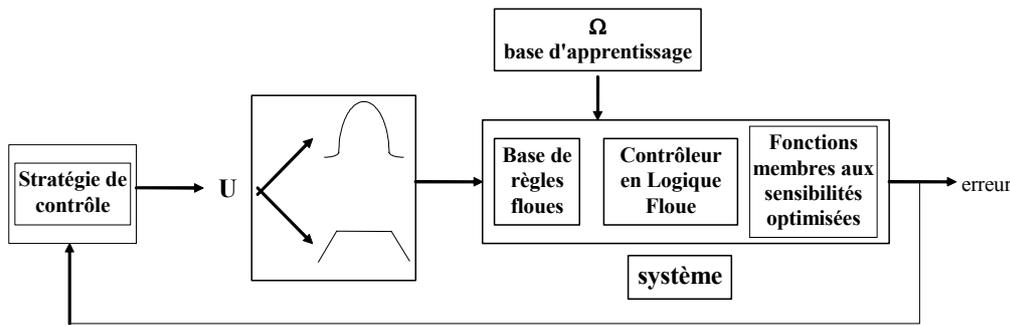


Figure 32 : contrôle du système en boucle fermée pour l'optimisation des formes et paramètres des fonctions membres

2.2.4 Analyse et discussion

Un modèle flou permet de simuler le raisonnement humain en exploitant la tolérance aux incertitudes et aux imprécisions apparaissant dans les systèmes complexes. Dans un modèle flou, la connaissance s'exprime sous formes de règles SI-ALORS, reliant les ensembles flous des variables d'entrée du système aux ensembles flous des variables de sortie. De cette manière, un modèle flou peut être considéré comme modèle qualitatif. En même temps, les calculs effectués sur les fonctions d'appartenance des ensembles flous confèrent à cette méthode un caractère hybride entre la modélisation numérique et la modélisation qualitative [ZAD-73]. Dans les travaux concernant la modélisation floue, nous avons privilégié la méthode de ABE pour extraire des règles floues directement à partir des données numériques. Cette méthode conduit à une grande précision mais outre son coût de calcul important, la génération des règles à plusieurs niveaux entraîne une perte de lisibilité. La réduction de la complexité de ce modèle fait défaut dans la littérature. Nous avons traité ce problème à deux niveaux à la fois en sélectionnant les paramètres d'entrée du modèle en ne conservant que les plus pertinents à la lumière des données de la base d'apprentissage en liaison avec la connaissance humaine plus générale lorsqu'elle est disponible ou encore en instaurant une structure hiérarchique optimisée qui permet de réduire drastiquement la complexité du nombre de règles au détriment de la précision. Afin de compenser cette dernière perte, nous nous sommes penchés sur l'optimisation des fonctions d'appartenance, aussi bien au niveau de leurs paramètres que de la forme la mieux adaptée pour compenser le manque de précision. L'introduction et la combinaison de plusieurs techniques d'apprentissage conduisent à des modèles performants. Outre les réseaux de neurones et les techniques floues, il existe d'autres techniques d'apprentissage automatique telles que les automates d'apprentissage, les algorithmes génétiques, etc. L'ensemble de ces techniques permet de résoudre les problèmes d'incertitude et d'imprécision en optimisation, en modélisation, en reconnaissance de formes, en diagnostic, en commande, etc. [NAJ-91]. Le modèle flou optimisé a trouvé des applications à la fois dans le thème 1 pour prédire la propriété fonctionnelle d'un matériau non-tissé en fonction de ses paramètres de structure ou encore trouvera son application dans le thème 2 en évaluation sensorielle des produits textiles.

2.3 PRESENTATION DES TRAVAUX REALISES DANS LE THEME 2

2.3.1 Introduction

Dans l'acte d'achat, le consommateur d'un article textile est sensible dans son choix, en dehors des aspects modes, à différents critères faisant appel à chacun de ses sens. Le premier

concerne la vue qui permet de prendre en compte l'apparence, mais aussi le volume des articles textiles. Le deuxième sens, et certainement l'un des plus difficile à interpréter, est celui de la couleur à la fois de l'article et des éléments qui lui sont associé et des différents types d'éclairage auquel il est naturellement soumis. Ensuite, dans sa décision d'achat, le consommateur valide son choix d'aspect et de coloris par celui du toucher qui correspond à des critères particulièrement subjectifs. Voici le cadre général dans lequel nous avons exprimé nos compétences en modélisation et en intégration des connaissances humaines pour développer une collection de méthodes permettant de déterminer la qualité des produits textiles par des mesures objectives associées à des modèles mathématiques donnant une interprétation à ces mesures. Cette démarche s'efforce d'apporter sa contribution au remplacement des évaluations subjectives de la qualité par les experts professionnels, considérées comme incertaines et imprécises, par une évaluation automatique sur un ensemble d'équipements métrologiquement fiables. Nos méthodes se sont exprimées majoritairement sur le sens du toucher des articles textiles, mais nous avons, au travers d'autres collaborations industrielles et universitaires, étendu ces méthodes à d'autres domaines comme la cosmétique et à l'analyse de données collectées auprès de panels de culture distinctes et de compétences différentes.

Une grande quantité de travaux de recherche ont été effectués afin de modéliser la corrélation entre l'évaluation objective et l'évaluation subjective. KAWABATA a proposé un modèle linéaire basé sur les mesures des propriétés mécaniques [KAW-96] et HU a établi un modèle psychophysique basé sur la loi STEVEN [HU-00]. PARK a développé un modèle pour l'évaluation du toucher en utilisant la logique floue et les réseaux de neurones [PAR-00]. Pourtant, les progrès dans ce domaine sont assez lents en raison des incertitudes et des imprécisions existant dans la formalisation de l'évaluation subjective des professionnels. Les difficultés principales peuvent se résumer de la façon suivante :

- en évaluation sensorielle au niveau expert, l'évaluation d'un échantillon (exprimée sous forme d'un score numérique ou d'un terme linguistique) donne un résultat relatif dépendant de la comparaison avec l'ensemble des autres échantillons. La note est significative uniquement pour une collection spécifique des produits et pour un individu particulier. Elle est difficile à normaliser dans un contexte général.
- en évaluation sensorielle à un niveau professionnel, les termes utilisés par des panels distincts pour un même ensemble de produits ne sont pas normalisés. Chaque panel utilise des termes qui lui sont propres. Le partage d'un terme en commun par différents panels ne recouvre pas obligatoirement la même sémantique.
- au sein d'un même panel professionnel, l'ensemble des termes utilisés est communément partagé jusqu'au niveau sémantique. Cependant, les échelles et le choix des bornes supérieures et inférieures utilisées par des individus différents et doivent absolument être unifiés sur une même échelle afin d'être en mesure de fusionner les données sensorielles pour un panel donné.
- au niveau du consommateur, les méthodes que l'on utilise se confondent souvent avec les méthodes employées pour l'analyse des données issues des professionnels. Ces méthodes doivent être adaptées au format des données des consommateurs afin de caractériser correctement l'évolution du marché.

Au cours de nos travaux sur cette thématique (cf. Figure 33), nous avons développé une description mathématique afin de formaliser les évaluations des experts et nous avons utilisé le contrôleur flou de type Mamdani afin de modéliser la relation entre ces deux évaluations. Nos contributions se retrouvent dans les deux volets suivants :

- Développement d'une nouvelle formalisation mathématique des évaluations subjectives du toucher retournées par des experts ou des panels entraînés. Cette formalisation permet de comparer des différents panels sensoriels, de les qualifier et de fournir des données subjectives pertinentes à la procédure de modélisation.
- Modélisation de la relation entre les évaluations objectives et subjectives et de la relation entre les paramètres de fabrication des étoffes et les évaluations objectives [T1]. Le premier modèle permet d'interpréter les mesures physiques du toucher par rapport aux critères sensoriels de conception de l'entreprise ou aux besoins de consommateurs tandis que le second modèle permet de régler les paramètres de fabrication pour qu'une demande spécifique de consommateurs par rapport au toucher des étoffes soit satisfaite. Les modèles utilisés ont été décrits dans la section 2.2.3.

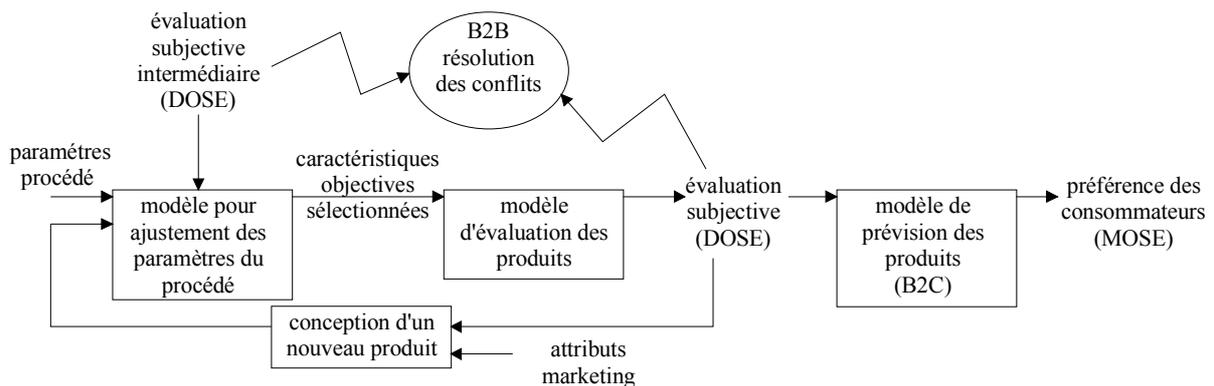


Figure 33 : schéma général décrivant les travaux du thème 2

L'évaluation sensorielle s'effectue par un ou plusieurs panels sensoriels. Un panel sensoriel est un groupe d'individus évaluant un ensemble d'échantillons représentatifs. Pendant chaque séance d'évaluation, chaque individu ou panéliste donne un score pour un ensemble de descripteurs sensoriels linguistiques sélectionnés pour discriminer les échantillons à évaluer. Le score, attribué par le panéliste, est une note numérique ou linguistique pour chaque échantillon selon son expérience professionnelle et son résultat de classification de ces échantillons. Dans les entreprises, différentes sortes de panels sensoriels sont utilisées selon les différents contextes. Ces panels sensoriels peuvent être classés en deux niveaux : (1) conception et développement de produits (B to B), et (2) étude du comportement des consommateurs et du marketing (B to C). Selon le livre de Dijksterhuis [DIJ-97], les panels sensoriels peuvent être généralement répartis en catégories suivantes :

Panels d'experts (cf. Tableau 3) : les experts spécialisés dans une technologie spécifique évaluent des produits typiques et définissent des critères d'évaluation,

Panels d'analyse de description quantitative : les panélistes entraînés évaluent des produits avec des termes linguistiques standards,

Panels à choix libre : chaque panéliste entraîné évalue des produits avec ses propres termes linguistiques,

Panel de consommateurs : les consommateurs non entraînés sont invités à évaluer des produits dans un laboratoire dans des conditions contrôlées,

Panels de rue : les consommateurs non entraînés sélectionnés de façon aléatoire dans les centres commerciaux par exemple, sont invités à répondre aux questions d'un questionnaire prédéfini.

Pour les panels de rue et les panels de consommateurs, les panélistes expriment des préférences ou des notes hédoniques par rapport aux produits évalués tandis que pour les trois autres panels de type entraîné, les panélistes décrivent les produits de façon la plus précise possible sur un ensemble de descripteurs sensoriels, sans connotation de préférence. D'un

panel de rue à un panel d'experts, le niveau d'entraînement et le niveau d'implication de connaissance spécialisée augmentent progressivement tandis que les influences liées à la préférence personnelle et au marketing diminuent (cf. Figure 34). Pour les données sensorielles collectionnées à partir des différents panels, les modèles mathématiques correspondants ainsi que les procédures de traitement de données sont différents.

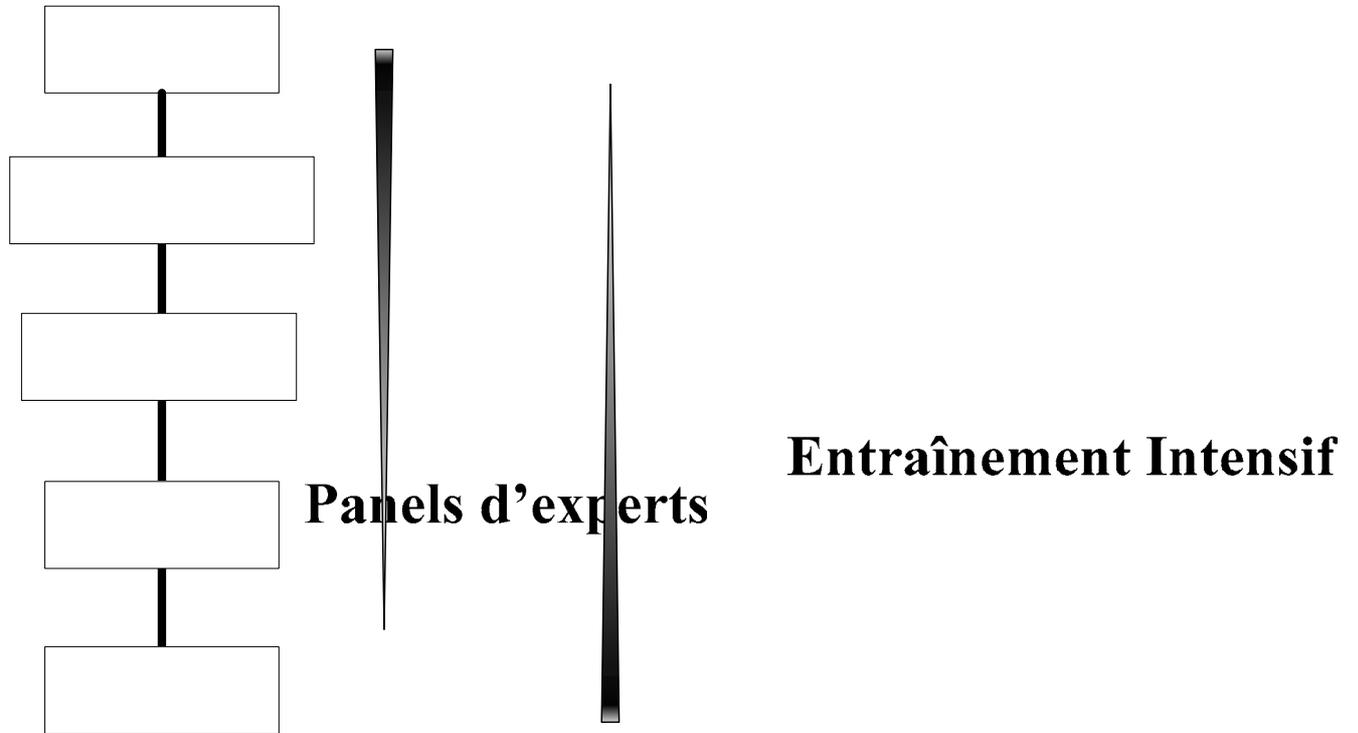


Figure 34 : Différents niveaux de panels

**Panels de l'analyse de
description quantitative**

Panels à choix libres

**Panels de
consommateurs**

Panels de rue

Code des échantillons	Doux	Glissant	Serré	Mou	Moelleux	Compact	Creux	Agréable	Frais	Dense	Souple
4-1	7	10	1	1	3	1	1	7	3	1	5
10-1	7	10	1	1	2	1	1	6	3	1	6
14-1	6	10	1	1	1	1	1	3	1	1	3
14-2	4	8	1	2	1	1	5	2	1	1	2
16-1	6	9	1	1	1	1	1	4	2	1	4
16-2	4	9	1	1	1	1	1	5	2	1	4
22-1	6	8	1	1	1	1	1	3	1	1	3
22-2	4	7	1	2	1	1	4	2	1	1	2
24-1	5	8	1	1	1	1	1	3	1	1	3
24-2	4	8	1	2	1	1	1	2	1	1	2
26-1	3	4	2	3	1	2	3	1	1	1	1
26-2	3	6	2	4	1	2	2	1	1	1	1
28-1	3	5	2	5	1	3	1	1	1	2	1
28-2	2	5	2	5	1	3	1	1	1	2	1
32-1	2	2	3	6	1	4	1	1	1	3	1
32-2	2	3	4	6	1	5	1	1	1	4	1
34-1	1	1	5	7	1	5	1	1	1	5	1
34-2	1	1	6	7	1	5	1	1	1	5	1

Tableau 3 : Extrait d'évaluation sensorielle experte du toucher d'échantillons de tricot en coton écru

En général, les données sensorielles sont collectées à l'aide d'un plan d'expérience. Ce plan est directement lié à la pertinence des résultats obtenus. Si la qualité des données collectionnées est mauvaise, aucune méthode de traitement de données ne peut conduire à des résultats pertinents. Comme la structure de données est différente pour les différents types de panels, les plans d'expérience conçus pour une application spécifique, comprenant la procédure détaillée d'évaluation et la méthode de sélection de panélistes, doivent être différents l'un de l'autre. Si le panel sensoriel se compose de consommateurs non entraînés, un questionnaire approprié doit être conçu afin de stimuler ces consommateurs à exprimer leurs intérêts sensoriels et leurs préférences sur les produits à évaluer [P19][C24][C29][C30][C34]. Si le panel sensoriel se compose d'experts spécialisés, une procédure d'évaluation doit être conçue pour que ces experts puissent fournir le maximum d'information pertinente sur les produits à évaluer. Un problème pratique dans la collection de données sensorielles est de concevoir un plan optimal pour que tous les produits puissent être évalués de la même manière avec un nombre minimum de tests quand le nombre de produits est grand et que le temps d'évaluation est limité. Dans la génération d'un plan d'expérience pour l'évaluation sensorielle, les évaluateurs doivent étudier tous les éléments qui pourraient intervenir dans la stratégie d'évaluation. Ces éléments seront pris en compte dans les tests sensoriels pour définir l'ordre de présentation des produits. Il existe un nombre considérable de publications sur les différentes méthodes pour concevoir des plans d'expérience [COC-57], [PUK-93], [PEA-93]. Cependant, la plupart de ces méthodes ont été développées pour des mesures physiques. Lorsque nous les appliquons à des données sensorielles, des besoins spéciaux doivent être considérés. Selon le livre de Herbert [HER-93], ces besoins spéciaux sont liés au fait que les réponses d'un évaluateur sont influencées facilement par sa connaissance sur les produits et par son expérience sur les tests précédents. Dans ce cas, des méthodes comme les plans de blocs équilibrés (balanced-block designs) doivent être utilisées pour que les interactions entre les évaluateurs, les produits et le temps soient minimisés et que chaque produit soit évalué, de façon égale, par chaque évaluateur par rapport aux autres

produits et évaluateurs. Nous nous sommes penchés sur ce point avec le concours d'un Professeur invité par notre équipe [P19].

2.3.2 Formalisation, normalisation et analyse des données sensorielles

En évaluation sensorielle, les résultats retournés par des individus distincts pour le même attribut-descripteur s'expriment le plus souvent en employant des échelles différentes. Cela tient au fait que la sensibilité de chacun pour évaluer un échantillon est liée fortement à l'environnement et à son expérience personnelle. De plus, les données sensorielles peuvent se présenter sous la forme de notes numériques ou encore prendre la forme d'expressions linguistiques. Ceci est fonction du niveau de l'évaluation : de l'expert au consommateur. En vue d'un traitement efficace de l'information, il est donc nécessaire de développer une échelle commune adaptée pour normaliser et agréger l'ensemble des données. Pour ce faire, un modèle flou linguistique peut être utilisé pour unifier des informations linguistiques multi-granulaires en minimisant la perte d'informations. A l'aide de ce modèle, les données sensorielles issues d'individus distincts pour un même descripteur peuvent être normalisées sur une échelle commune afin de fournir une donnée normalisée pour l'étape de l'analyse. Dans le monde réel, il existe un grand nombre d'aspects pour lesquels il est très difficile d'adopter une notation et/ou une gradation sous une forme quantitative. Le plus souvent, il est plus facile d'utiliser une forme qualitative où un classement entre les différents échantillons, pour évoquer une gradation selon un aspect. Dans ce cas précis, une meilleure approche, plus proche du raisonnement humain pour la qualification d'un aspect, consiste à utiliser une expression linguistique en lieu et place de valeurs numériques. Dans l'évaluation sensorielle, les évaluations peuvent être de genres diverses et les échelles utilisées peuvent inclure à la fois de l'information quantitative mais aussi de l'information qualitative. C'est ainsi que quelques individus peuvent exprimer leur ressenti sensoriel sous une forme quantitative (sous forme d'une note) alors que d'autres peuvent employer une forme qualitative ("plus doux", "moins doux", etc...). Par conséquent, nous devons développer une approche capable d'intégrer les deux formes d'information en minimisant, dans le même temps, la perte d'information.

Normalement, au sein d'un panel, les données sensorielles sont exprimées en employant une base commune de termes dont les sémantiques sont communément partagées après des séances où les membres ont convergé vers un compromis. Cependant, pour chaque terme, un individu dans un panel peut utiliser les descriptions numériques, symboliques, ou linguistiques avec des échelles différentes. Par exemple, au sein d'un panel, un individu utilise une échelle graduée de 0 à 10 (forme numérique) pour décrire ses données sensorielles pour un terme, alors qu'un autre emploiera "très grand", "grand", "moyenne", "petit", "très petit" (format linguistique). Certains panélistes peuvent utiliser aussi un autre format pour exprimer leur ressenti, sous forme de symbole : par exemple, "doux⁺" ou "doux⁺⁺" ou "doux⁻". Par conséquent, il faut trouver une approche pour unifier ces données sensorielles multi-granulaires, donc un opérateur de fusion pour agréger les informations numériques, symboliques et linguistiques.

2.3.3 Normalisation de données sensorielles

La Figure 35 représente la structure du modèle proposé pour la normalisation des données sensorielles sous leurs différentes formes. Nous pouvons observer dans la Figure 35 que le modèle se décompose en trois parties :

1° En utilisant un modèle flou linguistique (2-tuple model), nous sommes en mesure de transformer les données de différents formats (linguistique, numérique et symbolique) issues d'individus différents sous un seul et même format numérique.

2° Sous la condition de deux critères d'optimisation explicités ci-après, nous proposons de définir une échelle quasi-optimale.

3° Fusion des données sensorielles à l'aide de l'échelle quasi-optimale évoquée au point précédent.

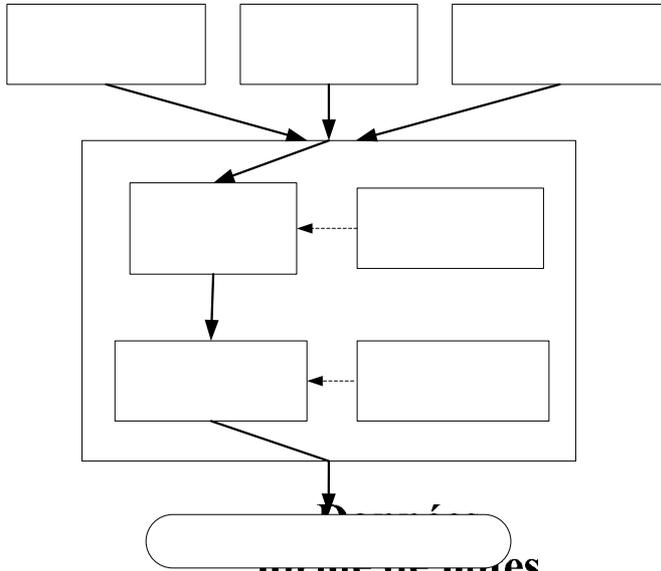


Figure 35 : Structure du modèle de normalisation des données sensorielles

forme de notes
numériques

Données
Forme
symbolique

Données
forme d'express
linguistique

En accord avec les étapes décrites ci-dessus, nous employons le modèle flou linguistique, basé sur un 2-uplet linguistique [HER-01], qui peut être considéré comme un pont pour l'unification des informations exprimées sous forme linguistiques et symboliques. De cette façon, les informations quantitatives et qualitatives peuvent être fusionnées sur le même domaine désiré avec le choix d'une échelle optimale commune.

Considérons un panel P_i constitué d'individus I_j ($j \in \{1, \dots, h(i)\}$), $h(i)$ étant le nombre de d'individus au sein du panel P_i appelés à évaluer n échantillons. Pour chaque terme a_{il} employé de l'ensemble de termes A_l , l représentera ici un terme précis sélectionné parmi une liste de $m(i)$ termes utilisés par l'ensemble des membres du panel. Que les données soient exprimées sous forme linguistique ou numérique, dénommées ici par $e_{ij}(k, l)$ à savoir la modalité attribuée à un échantillon k pour le terme l par un individu j , il est toujours possible de considérer ces expressions en autant de modalités qu'il en existe de différentes et de les reporter sur une échelle en leur associant une relation d'ordre. Dès lors, les données sensorielles correspondantes varient désormais entre 0 et $g(i, j, l) = \max\{e_{ij}(k, l) \mid k = 1, 2, \dots, n\}$, $g(i, j, l)$ étant la plus grande modalité sur l'échelle transformée.

L'ensemble des scores attribués aux échantillons par un panel et pour un descripteur particulier peut s'écrire sous forme matricielle, de la façon suivante :

$$E_i(l) = \begin{bmatrix} e_{i1}(1, l) & \dots & e_{i, h(i)}(1, l) \\ \dots & \dots & \dots \\ e_{i1}(n, l) & \dots & e_{i, h(i)}(n, l) \end{bmatrix}$$

Transformation
du format des
données en
numérique

2-tuple Model

Recherche d'une
échelle commune
quasi-optimale

Calcul de l'échelle
optimale

Normalisation des données à l'aide de l'échelle optimale.

Cette nouvelle échelle peut alors être considérée comme un ensemble flou multicritères comportant $g(i, j, l) + 1$ modalités et noté $U_{ijl} = \{u_0, u_1, \dots, u_{g(i, j, l)}\}$. Cette représentation est illustrée dans la Figure 36.

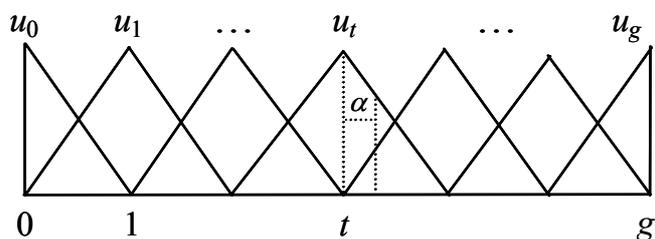


Figure 36 : Ensemble flou multi-critères U_{ijl} comportant $(g+1)$ modalités

Pour simplifier l'écriture et lorsqu'il n'y aura pas d'ambiguïté, $g(i, j, l)$ sera noté g . La note attribuée par I_{ij} pour le descripteur a_{il} est incluse dans l'intervalle $[0, g]$ et elle peut dès lors être représentée par le couple (u_t^g, α^g) avec $\alpha^g \in [-0,5, 0,5]$. Cette forme d'écriture nous autorisera par la suite de rechercher plus facilement le nombre optimal de modalités capable de définir une échelle unifiée.

Pour chaque $\beta \in [0, g]$, le couple qui traduit l'information équivalente dans une échelle unifiée est obtenue par l'équation suivante ($E(\cdot)$ désigne ici la partie entière), Δ étant le nom de la transformation associée :

$$\Delta(\beta) = \begin{cases} u_t & t = E(\beta) \\ \alpha = \beta - t & \alpha \in [-0,5, 0,5] \end{cases} \text{ et } \Delta^{-1}(u_t, \alpha) = t + \alpha = \beta$$

Pour le panel P_i , les résultats des évaluations de tous les individus I_{ij} peuvent être agrégés en transformant tous les sous-ensembles flous sur une même échelle unifiée.

Dès lors, $u_{g(i, l)}$ désignera la nouvelle modalité maximale (notée u_g lorsqu'il n'y aura pas d'ambiguïté) sur l'échelle unifiée pour l'ensemble des individus de P_i et pour le terme a_{il} . Pour chaque individu I_{ij} , chaque note (u_t^g, α^g) pour le terme considéré est alors transformé en un nouveau couple :

$$(u_z^{ug}, \alpha^{ug}) = \Delta\left(\frac{\Delta^{-1}(u_t^g, \alpha^g) \cdot u_g}{g}\right)$$

On transforme ainsi la note t par la note z en utilisant la fonction $Tr : z = Tr(t, g, u_g)$, illustrée dans la Figure 37.

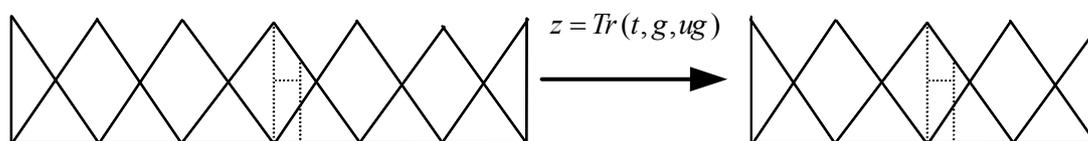


Figure 37 : Transformation à l'échelle unifiée u_g

Afin de fusionner l'ensemble des données sensorielles de plusieurs individus au sein d'un même panel, nous devons trouver une valeur optimale de l'échelle unifiée u_g pour tous les individus du panel P_i .

Pour le panel P_i , l'échelle optimale commune peut être conçue en postulant les deux principes suivants :

- les données sensorielles rendues par un individu I_{ij} doivent explorer au maximum toutes les modalités de l'échelle commune et donc chaque modalité $u_z^{ug} (z \in \{0,1,2,\dots,ug\})$ doit au moins être visitée une fois dans le meilleur cas possible. De cette façon on s'assure que l'on utilise correctement toutes les modalités,
- la variation des données sensorielles sur cette échelle unifiée doit changer le moins possible après l'étape de transformation. On s'assure ainsi de la perte minimale des informations au cours de l'étape de transformation.

Si les données sensorielles de I_{ij} , pour évaluer n échantillons de la base $T = \{t_k | k = 1, \dots, n\}$, avec le terme a_{il} avant transformation correspond à l'ensemble $\{e_{ij}(1,l), e_{ij}(2,l), \dots, e_{ij}(n,l)\}$, après transformation, il devient $\{z_{ij}(1,l), z_{ij}(2,l), \dots, z_{ij}(n,l)\}$, où $z_{ij}(k,l) = Tr(e_{ij}(k,l), g, ug)$ pour $k = 1, 2, \dots, n$ (k : index du $k^{ième}$ échantillon) et $l=1, 2, \dots, m(i)$ (l : index du terme a_{il}).

En accord avec le premier postulat, nous calculons tout d'abord le nombre de fois qu'une modalité q est visitée sur l'échelle unifiée ug , ainsi :

$$N_{_mod_i}(l, q) = \sum_{j=1}^{h(i)} \sum_{k=1}^n equ(z_{ij}(k,l), q) \text{ avec } q \in \{1, \dots, ug\} \text{ et } equ(p, q) = \begin{cases} 1 & \text{si } p = q \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Le critère de couverture sur l'échelle unifiée peut alors s'écrire de la façon suivante :

$$Cover_i(l, ug) = \min \{ N_{_mod_i}(l, q) | q = 0, 1, 2, \dots, ug \}$$

Selon le critère défini, ug doit être sélectionné de telle façon que $Cover_i(l)$ atteigne son maximum. Si sa valeur est nulle, alors cela signifie qu'il existe au moins une modalité u_z^{ug} non significative sur l'échelle unifiée ug .

En accord avec le second postulat, la différence de la tendance entre les deux ensembles de scores avant transformation $\{e_{ij}(1,l), e_{ij}(2,l), \dots, e_{ij}(n,l)\}$ et après $\{z_{ij}(1,l), z_{ij}(2,l), \dots, z_{ij}(n,l)\}$ doit être le plus petit que possible. Le critère correspondant peut s'écrire :

$$Trend_i(l, ug) = D(E_i(l), Z_i(l))$$

Où $Z_i(l)$ correspond à la matrice $E_i(l)$ après sa transformation. $D(E_i(l), Z_i(l))$ est une distance qui sera définie dans la section 2.3.4. Elle est calculée à partir des variations internes relatives des notes attribuées au sein de chacune des matrices et caractérise les distances qui existent avant et après la transformation entre ces variations de scores.

Par la suite, nous évaluons la quantité $Trend_i(l, ug)$ pour toutes les modalités possibles de l'échelle unifiée ug . Il devient donc possible d'estimer sa moyenne, notée $Trend_avg_i(l)$. Cependant si l'on trouve une valeur de ug pour laquelle $Trend_i(l, ug) > Trend_avg_i(l)$, alors on ne retient pas ce choix dans la mesure où effectivement, la couverture sera maximum car le nombre de modalités sera très faible, mais en revanche la conservation de la tendance sera quant à elle trop faible et l'échelle ne sera pas optimale. Il faut en effet trouver un compromis entre les deux critères. Ce compromis combine à la fois une bonne couverture et donc un nombre plutôt faible de modalités et à la fois une conservation de la tendance, c'est-à-dire que les variations de notes entre avant et après la variation doivent être conservées au maximum et par conséquent diminuent la perte d'information, contrainte qui, a contrario, tend plutôt à augmenter le nombre de modalités. Au final, le nombre de modalités optimales ug , autrement dit l'échelle optimale, peut être obtenue en trouvant un compromis acceptable entre les deux critères et une minimisation de la combinaison linéaire suivante :

$$\min \{ Trend_i(l, ug) - \rho \cdot Cover_i(l, ug) \}$$

où ρ est une constante positive de pondération entre les deux critères. L'expérience montre en fait que le premier critère de couverture est aisément respecté. Plus le nombre de modalités sera faible et plus la probabilité de visite des modalités est grande. En revanche, la contrainte maximale correspond toujours au facteur de tendance. Un trop faible nombre de modalités ne traduit plus la conservation de la disparité des notes de l'évaluation avant la transformation et conduit donc à une très forte perte de l'information.

Sur l'échelle commune optimale définie précédemment, les notes préalablement transformées pour le terme a_{il} et pour tous les individus peuvent être fusionnées à l'aide d'un opérateur. La note finale obtenue pour P_i pour un échantillon et pour le terme a_{il} s'exprime alors de la façon suivante :

$$\left(\bar{u}_z^{ug}, \bar{\alpha}^{ug} \right) = \Delta \left(\frac{\sum_{j=1}^{h(i)} \Delta^{-1}(u_{z_j}^{ug}, \alpha_{z_j}^{ug})}{h(i)} \right)$$

où $(u_{z_j}^{ug}, \alpha_{z_j}^{ug})$ résulte de la transformation de la note attribuée par l'individu I_{ij} pour un même échantillon selon le descripteur a_{il} .

De la même façon, toutes les notes fusionnées de P_i pour l'ensemble des descripteurs A_i sont transformées sur une échelle unique et constituent dorénavant une matrice Z_i de dimension $n \times h(i)$. Chaque élément de la matrice transformée $Z_i(l)$, associée au terme a_{il} , est en fait constitué d'un couple noté $(u_{z_i(k,l)}, \alpha_{z_i(k,l)})$ pour $k = 1, 2, \dots, n$ et $l = 1, 2, \dots, m(i)$. Dans un souci de simplification, ce dernier couple peut être remplacé par une valeur unique $z_i(k,l)$ en raison de la faible influence de $\alpha_{z_i(k,l)}$. En effet, ce dernier écart par rapport à la note entière peut être négligé devant la valeur entière. A partir des $m(i)$ matrices $Z_i(l)$, nous pouvons construire la matrice S_{ij} de dimension $n \times m(i)$ représentant l'évaluation de l'ensemble des n échantillons pour un individu selon l'ensemble des descripteurs employé par le panel P_i . La matrice $S_{ij} = (s_{ij}(k,l))_{n \times m(i)}$, $k = 1, \dots, n$ et $l = 1, \dots, m(i)$ comprend dès lors l'évaluation des échantillons sur les nouvelles échelles unifiées pour un individu et tous les descripteurs. En supposant que la définition des termes est communément partagée par l'ensemble des panélistes (même sémantique), nous pouvons utiliser le calcul de la moyenne sur l'ensemble des panélistes pour passer de l'ensemble des matrices S_{ij} ($j = 1, 2, \dots, h(i)$) à l'unique matrice moyenne $S_i = (s_i(k,l))_{n \times m(i)}$

$$\text{avec } s_i(k,l) = \frac{1}{h(i)} \cdot \sum_{j=1}^{h(i)} s_{ij}(k,l).$$

Dans le domaine de l'évaluation sensorielle, les méthodes d'analyse les plus usitées sont basées sur l'analyse factorielle (telle que l'analyse en composantes principales, l'analyse des correspondances et analyse de Procruste). Elles constituent un ensemble de techniques de calculs pour interpréter et analyser les données sensorielles. Bien qu'elles soient robustes, ces méthodes présentent quelques faiblesses. Ces analyses statistiques ne sont vraiment performantes que lorsqu'il existe un grand nombre de données numériques. De plus, elles ne sont pas capables d'intégrer des formats de données différents du format numérique. Basées majoritairement sur des projections linéaires (il existe aussi des projections sur des axes curvilignes), elles ne sont en mesure que de refléter ou d'analyser les relations linéaires entre les données. Dans le domaine sensoriel, nous sommes confrontés à plusieurs problèmes qui ne trouvent pas une réponse complètement satisfaisante avec les outils statistiques classiques et qui possèdent uniquement des bases incomplètes de données d'apprentissage. D'une part,

comme l'évaluation sensorielle traduit un ressenti humain, elle s'exprime rarement au travers de données numériques, mais plutôt avec des termes proches du raisonnement humain, à savoir symbolique ou linguistique. D'autre part, les relations qui peuvent exister entre les différents termes employés pour décrire le ressenti humain ne sont que très rarement linéaires. Enfin, chaque individu qui exprime son ressenti le replace dans son propre espace d'évaluation avec un système d'axe, des échelles et des bornes qui lui sont propres. En raison de ce contexte particulier, rechercher la dissimilarité qui existe entre deux évaluations réalisées dans des espaces distincts est rendue difficile. Les outils statistiques n'apportent pas une solution complète à la problématique et c'est la raison pour laquelle nous proposons une nouvelle méthode basée sur les variations internes relatives des données sensorielles exprimées dans leurs espaces respectifs.

2.3.4 Définition de distances et de sensibilité inter et intra-panels

Ci-dessous, à partir des matrices globales obtenues pour tous les individus d'un panel $P_i, S_i (i \in \{1, 2, \dots, r\})$ par la méthode proposée, nous introduisons les formules de calcul des critères de distance et de sensibilité en évaluation sensorielle afin d'analyser les performances des panélistes (qualification du panel) ou encore la qualité des descripteurs utilisés. Ces mêmes formules forment, dans le même temps, la base du modèle de corrélation entre les termes, à savoir la mise en place du dictionnaire.

Etant données les données sensorielles retournées par deux panels P_a et P_b , elles constituent deux espaces d'évaluation distincts. La dissemblance entre P_a et P_b ne peut pas être définie en utilisant les méthodes classiques qui calculent les distances entre les composantes des deux espaces dans la mesure où deux vecteurs (deux colonnes des matrices respectives S_a et S_b) ne sont pas plongés dans le même espace. Tout d'abord, afin d'éliminer les facteurs d'échelle entre les données, la première étape consiste à normaliser dans l'intervalle $[0, 1]$ l'ensemble des données sensorielles de S_a et de S_b respectivement. Dès lors, S_a et S_b sont transformées en leur matrice normalisée correspondante $U_a = u_a(k, l)$ et U_b .

La transformation est la suivante :

$$u_i(k, l) = (s_i(k, l) - s_{\min}(l)) / (s_{\max}(l) - s_{\min}(l))$$

avec, $i \in \{a, b\}$, $s_{\min}(l)$ représente le minimum de $[s_i(1, l), \dots, s_i(n, l)]^T$ et $s_{\max}(l)$ représente le maximum de $[s_i(1, l), \dots, s_i(n, l)]^T$.

Ensuite, nous allons définir une distance (en fait une dissemblance) entre deux panels P_a et P_b à partir des matrices U_a et U_b .

Pour la distance définie ici, les variations relatives des données seront considérées. Si les variations internes relatives des données dans leur espace respectif de ces deux panels sont proches l'une de l'autre, alors la distance entre les panels sera faible. Sinon, cette distance est grande. En accord avec ce principe, la distance entre P_a et P_b est définie par

$$D_{ab} = \frac{2}{n(n-1)} \cdot \sum_{\substack{k < k' \\ (k, k') \in \{1, \dots, n\}^2}} d_{ab}(k, k')$$

Elle dépend des éléments suivants :

- la dissimilarité entre P_a et P_b est liée à la variation des évaluations entre les échantillons t_k et $t_{k'}$: $d_{ab}(k, k') = |vr_a(k, k') - vr_b(k, k')|$.

- les variations internes pour les échantillons t_k et $t_{k'}$ pour P_a et P_b :

$$vr_a(k, k') = \frac{1}{\sqrt{m(a)}} \|U_{ak} - U_{ak'}\|$$

$$\text{avec} \begin{cases} U_{ak} = (u_a(k,1), u_a(k,2), \dots, u_a(k, m(a)))^T \\ U_{ak'} = (u_a(k',1), u_a(k',2), \dots, u_a(k', m(a)))^T \end{cases}$$

$$vr_b(k, k') = \frac{1}{\sqrt{m(b)}} \|U_{bk} - U_{bk'}\|$$

$$\text{avec} \begin{cases} U_{bk} = (u_b(k,1), u_b(k,2), \dots, u_b(k, m(b)))^T \\ U_{bk'} = (u_b(k',1), u_b(k',2), \dots, u_b(k', m(b)))^T \end{cases}$$

L'introduction de D_{ab} nous permet de comparer pour deux panels les variations relatives qui existent dans leur façon d'évaluer une base d'échantillons de T . D_{ab} atteint son minimum (valeur nulle), si et seulement si, les variations internes pour les deux panels distincts sont identiques.

De la même façon, nous pouvons définir un critère afin de comparer deux panels en accord avec la sensibilité des données pour l'évaluation des échantillons de T .

$$\text{La sensibilité de } P_a \text{ se définit par } SSB_a = \frac{2}{n(n-1)} \cdot \sum_{\substack{k < k' \\ (k, k') \in \{1, \dots, n\}^2}} vr_a(k, k')$$

où, $vr_a(k, k')$ caractérise la variation relative des notes de P_a entre deux échantillons t_k et $t_{k'}$.

Si la valeur SSB_a est plus grande que celle de SSB_b , alors cela signifie que P_a est plus discriminant pour évaluer les échantillons de T que P_b . Pour autant, cela ne signifie pas que P_a est meilleur que P_b . La qualité et le nombre de termes employés, la stabilité des membres et leur capacité à reproduire les mêmes évaluations pour les mêmes échantillons, enfin la non redondance entre les termes employés sont autant d'éléments qui participent à la qualité d'un panel.

2.3.5 D'une valeur numérique précise de distance à une distance floue

Les critères de dissimilarités et de sensibilité inter et intra panel présentés ci-dessus ne peuvent être utilisés qu'à titre de comparaison. En effet, la difficulté majeure réside dans l'interprétation directe de ces valeurs numériques précises de manière absolue. De façon à rendre à ces distances calculées une lisibilité accrue, nous nous sommes proposés de les transformer en des nombres flous, pour lesquels les sous-ensembles sont générés à partir des distributions de densité de probabilité correspondantes de matrices d'évaluation générées aléatoirement. La Figure 38 illustre la distribution de la probabilité de la distance D_{ab} entre deux panels P_a (panel d'experts français de la mode) et P_b (panel entraîné d'étudiants français de l'École de Biologie Industrielle de Pontoise) employant respectivement 11 et 6 descripteurs. Les sous-ensembles correspondant aux cinq valeurs floues qui divisent équitablement l'aire de cette distribution sont donnés dans la Figure 39. A partir de ces sous-ensembles, nous obtenons une qualification nuancée de D_{ab} , correspondant à une partition floue $\{VS, S, M, L, VL\}$, dont ces 5 éléments représentent respectivement "very small", "small", "middle", "large" et "very large".

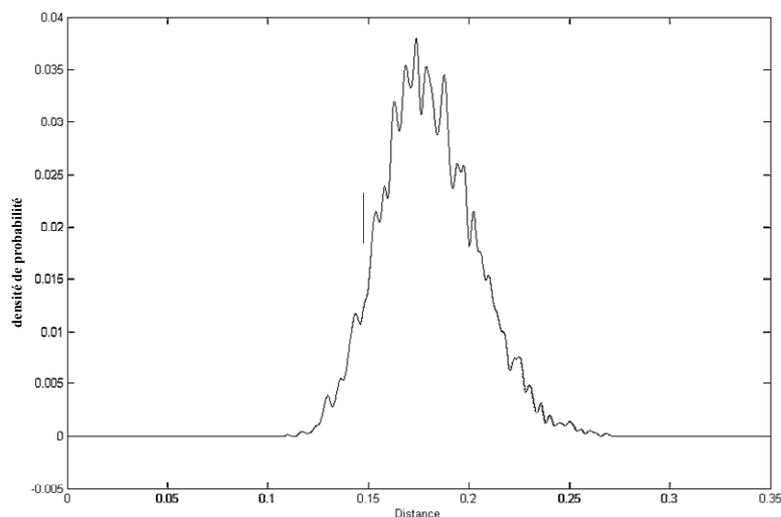


Figure 38 : Fonction de distribution des distances obtenue à partir de notes aléatoires uniformément distribuées entre 2 panels P_a et P_b

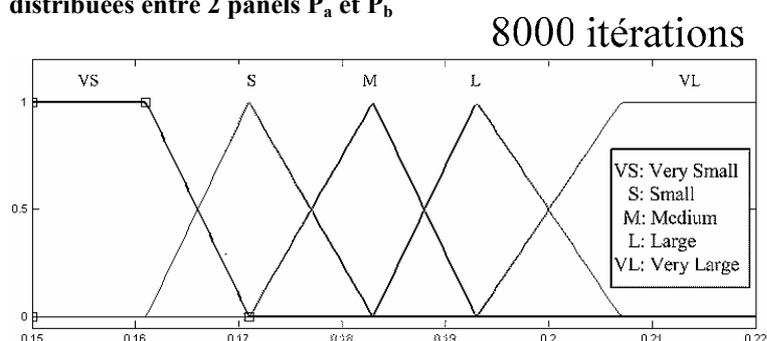


Figure 39 : Cinq fonctions d'appartenance floues correspondante à la fonction de distribution des distances représentées à la Figure 38

Par le biais de cette représentation, il devient désormais possible d'évaluer le comportement de panels distincts et de les comparer beaucoup plus simplement avec une meilleure interprétation. La valeur de la distance calculée est retournée sous une forme linguistique (grande, petite ou moyenne) beaucoup plus proche du raisonnement humain (cf. Tableau 4).

Processus	Cardé				Peigné				Open-End					
	panels	CE	FTS	CTS	CE	FTS	CTS	CE	FTS	CTS	CE	FTS	CTS	
FE	VS	VS	0,813	VS	S	0,417	S	0,417	VL	VS	VS	0,031	VS	0,969
		S	0,187		M	0,583	M	0,583		S	0,969	S	0,031	
CE		VS	0,813	VS		VS	VS		VS	VS	0,969	VS	0,344	
		S	0,187							S	0,031	S	0,656	
FTS			VS	0,125			VS					L	0,100	
			S	0,875								VL	0,900	

CE&FE : panels d'experts chinois et français – CTS&FTS : panels entraînés chinois et français

Tableau 4 : valeurs floues des distances inter-panels pour le descripteur 'doux'

C'est à l'aide de cette collection d'outils qu'il nous a été possible de quantifier d'une part que l'évaluation sensorielle globale des produits n'est pas liée à la culture et que quelque soit son origine, on est capable de discriminer globalement de la même façon les produits sensoriellement. En revanche, l'acuité de cette discrimination dépend de l'expérience professionnelle. Cette expérience guide dans le même temps la richesse du vocabulaire employé (nombre de descripteurs) et la maîtrise des termes usités (sensibilité). Il apparaît aussi très nettement que deux panels distincts peuvent employer le même descripteur alors qu'il ne recouvre pas la même sémantique pour les deux panels. C'est une grande source de

conflits entre les clients et les fournisseurs de produits industriels qui ralentit notablement le temps de conception des produits. Il nous a été donc possible, à l'aide des critères développés et de notre compétence acquise dans le développement des modèles, de déterminer les liaisons qui existent entre un terme employé par un panel et la liste des autres termes employés par un autre panel. Cette notion pourrait se comprendre comme la mise en place d'un dictionnaire qui permet aux acteurs industriels de mieux communiquer entre eux sur la qualité sensorielle des produits. Ces résultats ont été constatés au travers de deux sources de données issues de l'industrie textile et de la cosmétique sur le sens du toucher.

2.3.6 Traitement de données sensorielles exprimée par des consommateurs

Dans un contexte où les activités industrielles se concentrent autour de la préférence des consommateurs, l'évaluation sensorielle orientée vers la mise sur le marché et donc proche du consommateur final présente un grand intérêt pour un grand nombre de sociétés. Chaque entreprise détient un grand nombre d'informations sur les comportements de consommateurs recueillies par leur propre système d'enquête au travers de questionnaires. Cependant, pour la méthode d'analyse de données, le plus généralement c'est à l'aide d'outils statistiques classiques que ces données sont analysées. Ces méthodes statistiques connaissent généralement des limites dues essentiellement à la qualité de l'information recueillie, à la taille des populations concernées ou encore à leur caractère le plus souvent basé sur des projections linéaires.

La structure singulière des données de consommateurs requière une attention particulière au niveau de leur traitement. Afin de pouvoir les intégrer dans notre schéma (cf. Figure 33), nous avons dû avoir recours à une formalisation et à la mise en place d'un critère de dissimilarité respectueux de la structure des données sensorielles de consommateurs. Basés sur ce critère, il devient possible non seulement de mettre en place les relations entre des évaluations sensorielles issues de panels professionnels et celles issues des consommateurs ou encore d'analyser la qualité des termes retenus au sein du questionnaire. La collection de méthodes employées doit permettre de prévoir et de traduire dans le cahier des charges la préférence des consommateurs correspondant à la création d'un nouveau produit à partir d'une gamme de produits existants.

Les études de marché sont apparues avec le développement de la production d'articles contemporains. Le développement d'une économie de commerce est le ressort fondamental de la création et de la mise en place d'enquêtes [KE-00]. Dans l'économie de marché, la production doit être coordonnée avec la consommation, c'est-à-dire que l'utilité du produit doit correspondre le plus exactement possible à la demande du consommateur. Par conséquent, l'entreprise doit connaître la demande, extraire la préférence et la capacité d'achat du consommateur afin de fabriquer le produit adéquat avec juste le niveau de qualité requis. Ces enquêtes ont pour finalité la gestion et la prise de décisions au sein des entreprises. L'étude de marché [ROL-05] de certains produits ou services consiste à enquêter auprès des habitudes du consommateur sur l'usage de l'article ou du service. Les services marketing interviennent dans le cycle de vie du produit, planifient, collectionnent les données consommateurs, enregistrent, analysent et interprètent ces informations afin d'apporter une aide à la décision pour les administrateurs. Leur travail se découpe en trois actions. La cible des études de marché est les consommateurs ou les utilisateurs de l'article ou du service tout au long du cycle de vie du produit (conception, lancement et maturité). La deuxième action concerne les méthodes scientifiques pour mener à bien les enquêtes de marché : planification, collection, enregistrement, analyse et interprétation des résultats. La troisième action concerne l'aide à la décision pour les administrateurs de l'entreprise à la lumière des résultats obtenus.

Notre contribution concerne le deuxième plan d'action sur le traitement de l'information recueillie auprès des consommateurs.

Considérant le terme d'évaluation ac_i , les résultats d'évaluations pour deux produits distincts t_k et $t_{k'}$ constituent deux lignes dans la matrice d'évaluation EC_i , à savoir $EC_i(k) = (ec_i(k,1), e(k,2) \dots e(k, o(i)))$ et $EC_i(k') = (ec_i(k',1), e(k',2) \dots e(k', o(i)))$. Chaque élément de la matrice correspond au pourcentage de consommateurs interrogés qui ont retenu un niveau d'intensité précis pour un attribut du produit évalué. Ces données peuvent par conséquent être considérées comme deux distributions différentes de probabilités à $o(i)$ niveaux selon l'échelle d'intensité perçue. Notre but est de trouver une méthode appropriée pour le calcul de la dissimilarité entre ces deux distributions. Dans le Tableau 5, nous reproduisons un exemple fictif pour deux échantillons k et k' pour un terme ac_i en supposant qu'il existe 4 niveaux d'intensité ordonnés de 1 à 4 pour le terme d'évaluation ac_i (ex. "pas doux", "peu doux", "doux" et "très doux").

Numéro d'échantillon	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Total
k	0,45	0,15	0,24	0,16	1,00
k'	0,43	0,10	0,26	0,21	1,00

Tableau 5 : exemple fictif de distribution pour deux échantillons particuliers k et k'

Au cours de travaux précédents [P9], nous avons proposé d'obtenir la distance entre deux échantillons t_k à $t_{k'}$ en calculant la différence entre les moyennes pondérées par un poids attribué à chaque niveau. Cette formulation possédait l'avantage de passer d'un vecteur à une note finale (d'un vecteur à un scalaire) pour les échantillons d'autant plus élevée que le niveau d'évaluation retenu majoritairement par les consommateurs était important (cf. Tableau 6).

Numéro d'échantillon	Niveaux (poids)				Score($S(k)$)
	Niveau 1 (0,25)	Niveau 2 (0,50)	Niveau 3 (0,75)	Niveau 4 (1,00)	
k	0,45	0,15	0,24	0,16	0,5275
k'	0,43	0,10	0,26	0,21	0,5625

Tableau 6 : Mode de calcul des scores finaux attribués aux échantillons du Tableau 5

Cependant, cette méthode de calcul sous forme de combinaison linéaire présentait le désavantage de présenter un défaut majeur lié à la perte d'informations. Pour un produit t_k , il est possible que le vecteur $EC_i(k)$ présente plusieurs maximums locaux. Par exemple, 0,45 et 0,24 sont deux maximums locaux pour la distribution $EC_i(k) = (0,45, 0,15, 0,24, 0,16)$. Dans ce cas, l'agrégation sous forme de moyenne ou encore de toute autre combinaison linéaire ne reflète plus la véritable distribution de départ. La combinaison linéaire conduit à une forte perte d'informations.

Toute nouvelle méthode d'agrégation proposée se doit de conserver à la fois le maximum d'information et dans le même temps de conserver la relation d'ordre qui existe entre les différents niveaux.

Pour un même terme a_{ci} , considérons la différences entre les deux vecteurs d'évaluation des échantillons t_k et $t_{k'}$, soit $\Delta_i(k',k) = EC_i(k) - EC_i(k') = (\varepsilon_{k'k}^i(1), \varepsilon_{k'k}^i(2), \dots, \varepsilon_{k'k}^i(o(i)))^T$ avec $\varepsilon_{k'k}^i(j) = ec_i(k',j) - ec_i(k,j)$. Des valeurs à la fois positives ou nulles et négatives existent dans $\Delta_i(k',k)$. L'ordre de ces valeurs en rapport avec les différents niveaux, en particulier les positions relatives entre les éléments positifs ou nuls et les éléments négatifs, sont physiquement importantes dans la caractérisation de la variation entre les échantillons $t_{k'}$ et t_k mais ne peuvent pas être prises en considération en terme de différence, ni au niveau de leurs moyennes, ni de tout autre combinaison linéaire. Afin d'améliorer la formalisation de la variation interne des données issues des consommateurs entre deux échantillons, nous introduisons la notion de "compensation des couples" notée EQ. Nous représentons dans la Figure 40 le résultat du calcul de la différence entre les deux distributions du Tableau 6.

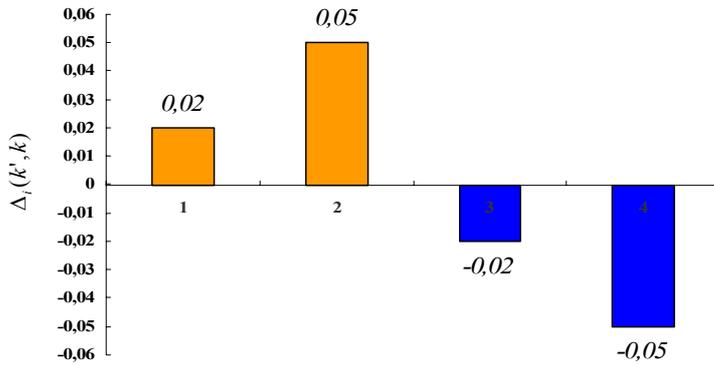
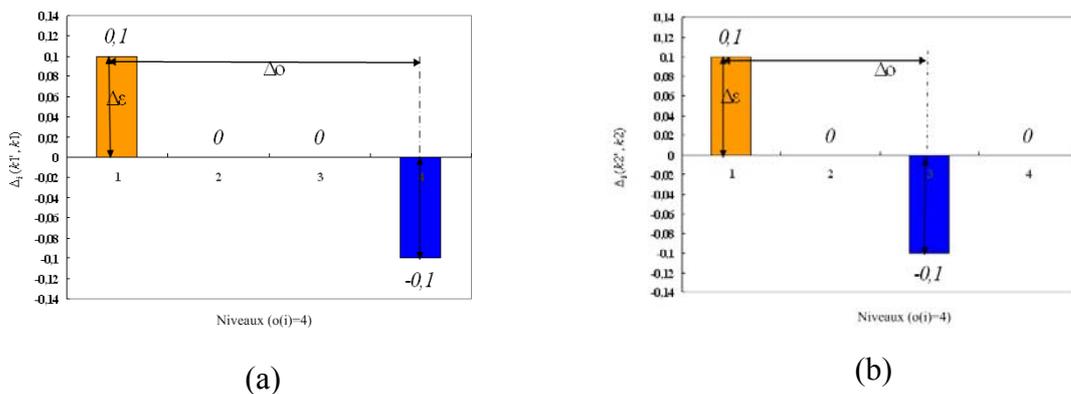
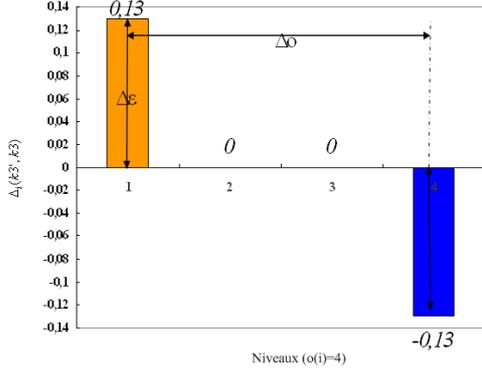


Figure 40 : Dissimilarité entre les deux distributions présentées dans le Tableau 6

Nous pouvons noter dans la Figure 40 que la dissimilarité $\Delta_i(k',k)$ est différente en raison d'une part des différences entre les valeurs de $\varepsilon_{k'k}^i(1), \varepsilon_{k'k}^i(2), \dots, \varepsilon_{k'k}^i(o(i))$ et d'autre part en raison de l'ordre qui correspond aux différents niveaux. A titre d'exemples, nous représentons différentes distributions possibles de dissimilarités dans la Figure 41. Les Figure 41(a) et Figure 41(b) ne diffèrent entre elles non pas au niveau des différences entre les évaluations ($\Delta\varepsilon$) mais bien au niveau de la différence de niveaux (Δo) qui existe dans les distributions. Les Figure 41(a)&(c) illustrent exactement l'inverse, à savoir que cette fois-ci ce ne sont plus au travers des niveaux que s'expriment les différences mais bien la différence entre les évaluations obtenues pour un même niveau. Δo est un facteur qui exprime la différence entre les ordres alors que $\Delta\varepsilon$ traduit la différence entre les évaluations $\varepsilon_{k'k}^i(1), \varepsilon_{k'k}^i(2), \dots, \varepsilon_{k'k}^i(o(i))$.





(c)

Figure 41 : Trois exemples de distributions pour Δ_i

Pour calculer la dissimilarité entre les données sensorielles issues de consommateurs pour deux échantillons, nous allons décrire le concept de "Compensation des couples".

Il est simple de montrer que la somme des composantes de $\Delta_i(k', k)$ est nulle, en effet :

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{k'k}^i(1) + \varepsilon_{k'k}^i(2) + \dots + \varepsilon_{k'k}^i(o(i)) \\ &= (ec_i(k', 1) - ec_i(k, 1)) + (ec_i(k', 2) - ec_i(k, 2)) + \dots + (ec_i(k', o(i)) - ec_i(k, o(i))) \\ &= (ec_i(k', 1) + ec_i(k', 2) + \dots + ec_i(k', o(i))) - (ec_i(k, 1) + ec_i(k, 2) + \dots + ec_i(k, o(i))) = 1 - 1 = 0 \end{aligned}$$

Dans ce cas, la somme des éléments positifs de $\Delta_i(k', k)$ est égale en valeur absolue à la somme des éléments négatifs. Dès lors, nous pouvons scinder en deux les différentes composantes de $\Delta_i(k', k)$, à savoir celles qui sont positives $\Delta_i^+(k', k)$ et les autres négatives $\Delta_i^-(k', k)$:

$$\Delta_i^+(k', k) = \{x \mid \varepsilon_{k'k}^i(x) > 0\} \text{ et } \Delta_i^-(k', k) = \{y \mid \varepsilon_{k'k}^i(y) < 0\} \text{ avec } (x, y) \in \{1, \dots, o(i)\}^2.$$

Considérant le fait que la somme des composantes de $\Delta_i(k', k)$ est nulle, nous pouvons toujours associer un élément positif et un élément négatif entre eux. Les deux éléments associés peuvent être considérés comme une paire d'équilibrage. Afin de conserver l'information sur la relation d'ordre qui existe entre les différents niveaux, nous devons définir une règle concernant la recherche de la paire à coupler. Avant de combiner une paire d'équilibrage, nous devons imposer une direction dans la recherche des paires à combiner : de gauche à droite ou de droite à gauche. Si la direction est de gauche à droite, on associe à un élément positif x (ou à l'élément négatif y) l'élément négatif y (l'élément positif x) qui est son plus proche voisin à sa droite. Un sens de lecture inverse conduirait au même résultat. La méthode de compensation est parfaitement symétrique par rapport à zéro. On peut considérer la dissimilarité posée.

Pour toutes les composantes de $\Delta_i(k', k)$, nous pouvons alors créer un ensemble de paires à équilibrer qui sont respectent le postulat précédent, à savoir :

$$EP_i(k', k) = \left\{ ((x, y); \delta(x, y)) \mid x \in \Delta_i^+(k', k), y \in \Delta_i^-(k', k), \sum_y \delta(x, y) = \varepsilon_{k'k}^i(x) > 0 \text{ et } \sum_x \delta(x, y) = -\varepsilon_{k'k}^i(y) > 0 \right\}$$

Dans chaque paire d'équilibrage $((x, y); \delta(x, y))$, x et y représentent les niveaux d'un élément positif et d'un élément négatif respectivement de $\Delta_i(k', k)$ et $\delta(x, y)$ correspond au poids d'équilibrage de la paire (x, y) . Nous avons alors $\varepsilon_{k'k}^i(x) > 0$ et $\varepsilon_{k'k}^i(y) < 0$. Dans un ensemble de paires d'équilibrage, la somme de tous les poids d'équilibrage des paires par rapport à x est $\varepsilon_{k'k}^i(x)$ et la somme de tous les poids d'équilibrage des paires par rapport à y est $-\varepsilon_{k'k}^i(y)$.

Par exemple, $\Delta_i(k', k)$ pour les deux échantillons dont la différence entre les distributions est représentée à la Figure 40 est $(0,02 \ 0,05 \ -0,02 \ -0,05)$. Dans cette configuration, les éléments positifs sont positionnés aux niveaux 1 et 2. Les éléments négatifs sont en position 3 et 4. L'ensemble des paires d'équilibrage devient alors $EP_i(k', k) = \{((1, 3); 0,02), ((2, 4); 0,05)\}$. La direction de la combinaison adoptée est de gauche à droite.

La "compensation des couples" de $\Delta_i(k', k)$ qui est à l'origine de la méthode décrite ci-dessus est noté $EQ(EP_i(k', k))$ et se définit par : $EQ(EP_i(k', k)) = \sum_{x \in \Delta^+(k, k')} eq(x, EP_i(k', k))$

Où $eq(x, EP_i(k', k))$ est la valeur de la compensation sur le niveau positif x . $eq(x, EP_i(k', k))$ peut être calculé par :

$$eq(x, EP_i(k', k)) = \sum_{y \in \Delta^-(k, k')} eq(x, y, EP_i(k', k))$$

$$\text{avec } eq(x, y, EP_i(k', k)) = \begin{cases} |x - y| \cdot \delta(x, y) & \text{si } (x, y) \in EP_i(k', k) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Un exemple est donné ci-dessous pour illustrer l'avantage de la compensation des couples dans le calcul de la variation de données d'un échantillon par rapport à un autre. Les données correspondantes des consommateurs sont données dans Tableau 7.

N° échantillons	Niveau 1	Niveau 2	Niveau3	Niveau4
3	0,50	0,10	0	0,40
4	0,40	0,10	0	0,50
5	0,40	0,10	0,05	0,45

Tableau 7 : exemple de 3 distributions de données

Dans cet exemple, il est facile d'observer que la dissimilarité qui sépare les échantillons 3 et 4 est plus grande que pour les échantillons 3 et 5. En effet, le premier niveau d'appréciation est plus proche du niveau 3 que du niveau 4. Pour les échantillons 3 et 4, l'ensemble de couples de compensation est $\{((1, 4); 0,10)\}$ et nous avons alors $EQ_i(3, 4) = 0,10 \times (4 - 1) = 0,3$. De la même façon, l'ensemble de couples de compensation pour les échantillons 3 et 5 est $\{((1, 3); 0,05), ((1, 4); 0,05)\}$ et nous avons $EQ_i(3, 5) = 0,05 \times (3 - 1) + 0,05(4 - 1) = 0,25$. Dans ce cas, $EQ_i(3, 4) > EQ_i(3, 5)$, ce qui est conforme à l'observation humaine sur la variation des distributions des évaluations entre les échantillons.

Pour illustrer l'avantage de la méthode de "Compensation des couples", un autre exemple est donné ci-dessous. Nous comparons les dissimilarités entre les données (échantillons 6, 7, 8). Nous employons trois méthodes afin d'obtenir deux dissimilarités (entre t_6 et t_7 , entre t_6 et t_8), à savoir : l'observation humaine (cf. Tableau 8), une méthode basée sur l'agrégation avec la moyenne [P9] (cf. Tableau 9) et la méthode de "Compensation des couples" (cf. Tableau 10).

N° échantillons	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Figure correspondante
6	0,40	0	0,36	0,24	Figure 42(a)
7	0,40	0	0,40	0,20	Figure 42(b)
8	0,20	0,50	0	0,30	Figure 42(c)

Tableau 8 : Comparaison des dissimilarités par observation humaine

Partie 2 : Présentation des thèmes de recherche

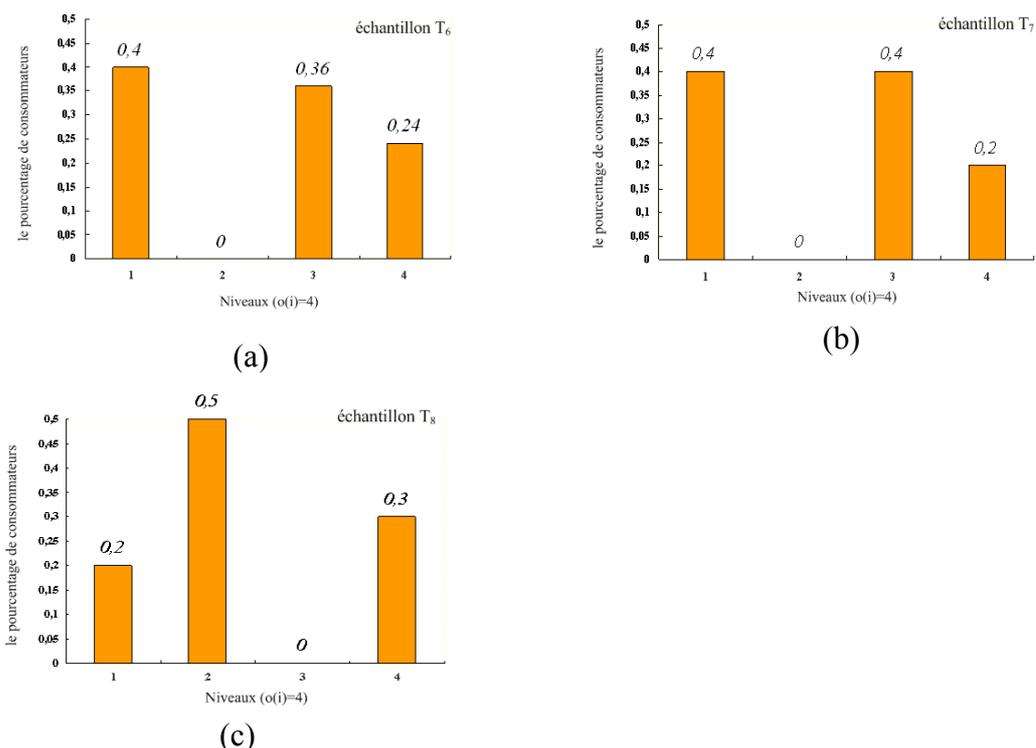


Figure 42 : Distributions d'évaluations de consommateurs du Tableau 8

Niveaux (poids) Numéro d'échantillon	Niveaux				Score($S(k)$)
	Niveau 1 (0,25)	Niveau 2 (0,50)	Niveau 3 (0,75)	Niveau 4 (1,00)	
6	0,40	0	0,36	0,24	0,61
7	0,40	0	0,40	0,20	0,60
8	0,20	0,50	0	0,30	0,60

Tableau 9 : Calcul des dissimilarités par agrégation basée sur la moyenne

$\Delta_i(k', k)$	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	$EQ(EP_i(k', k))$
$\Delta_i(6,7)$	0	0	-0,04	0,04	0,04
$\Delta_i(6,8)$	0,20	-0,50	0,36	-0,06	0,56

Tableau 10 : Comparaison les dissimilarités par la méthode de "Compensation des couples"

Tableau 8, Tableau 9 et Tableau 10 tentent de mettre en évidence la nécessité de mettre en place une méthode capable de calculer les dissimilarités entre deux distributions d'évaluations sensorielles par des consommateurs. Pour montrer la supériorité de la méthode dite de "Compensation des couples", nous avons fait le choix de trois distributions fictives échantillons et comparé les différentes méthodes de calcul. Dans le Tableau 8, en accord avec l'observation humaine, la dissimilarité entre t_6 et t_7 est moins grande que la dissimilarité entre t_6 et t_8 de toute évidence. Le Tableau 9 montre au travers du calcul des scores que les écarts $|s(6) - s(7)|$ et $|s(6) - s(8)|$ sont égaux et donc ce résultat conduit à ne pas être en mesure de distinguer la dissimilarité entre t_6 et t_7 et entre le couple d'échantillons t_6 et t_8 . Dans le Tableau 10, la dissimilarité $\Delta_i(6,7)$ est bien inférieure à la dissimilarité $\Delta_i(6,8)$. Nous sommes avec cette dernière méthode bien en mesure de discriminer les différences qui existent entre les distributions. La méthode de "Compensation des couples" est proche des dissimilarités que

nous souhaitons calculer et sa supériorité est liée au fait qu'elle est capable de s'adapter à la prise en compte de plusieurs maxima locaux dans des distributions.

A l'aide de cette nouvelle mesure de dissimilarité mise en place entre différentes évaluations retournées par des consommateurs, il nous est désormais possible de comparer des évaluations réalisées sur un produit par des experts professionnels et par des panels de consommateurs. Ces comparaisons sont basées sur les méthodes décrites dans les sections précédentes (sections 2.3.4 et 2.3.5). Il devient non seulement possible de mesurer et même d'interpréter les écarts entre l'évaluation professionnelle et celle exprimée par les consommateurs. Pour une entreprise, cela signifie qu'elle est en mesure de savoir quels sont les termes qu'elle emploie pour qualifier son produit sensoriellement qui sont au final perçus par leurs consommateurs.

2.3.7 Système de démonstration d'évaluation sensorielle en ligne

En général, les chaînes d'approvisionnement ont des degrés d'intégration différents. Dans une chaîne logistique où le degré d'intégration de l'information est faible, la liaison entre les partenaires industriels est plutôt lâche et instable. Afin de protéger leurs propres intérêts, ces entreprises ne souhaitent pas partager leurs ressources d'information avec leurs partenaires. Cependant, dans une chaîne logistique intégrée où une entreprise joue un rôle de dirigeant (donneur d'ordres – entreprise noyau), le degré d'intégration est plus élevé. Dans une telle chaîne d'approvisionnement, le déploiement d'un système d'évaluation sensorielle est plus significatif, plus efficace et facile à manier [WAL-01], [CHR-99], [ZHO-02]. La Figure 2 et le Tableau 11 représentent une telle chaîne intégrée empruntée au domaine de l'industrie textile. Le flux de produit est de gauche à droite, des fournisseurs de fils jusqu'au distributeur. L'information sur la qualité sensorielle des produits prend rigoureusement le chemin inverse. Dans la Figure 2, nous pouvons voir que ce système destiné à l'évaluation sensorielle est exécuté dans le système d'informations de l'entreprise noyau de la chaîne. Le centre d'étude du marché (MAC) peut être le plus souvent considéré comme une entreprise noyau. C'est depuis ce centre que sont collectées les informations auprès des consommateurs pour être répercutées après analyse auprès des décideurs de l'entreprise et remontées auprès des fournisseurs en amont.

Dans un tel système, tous les partenaires de la chaîne peuvent visiter le système web en utilisant Internet. L'interface entre Internet et le système d'informations de l'entreprise constitue le DDN (Digital Data Network). DDN présente les avantages de la haute vitesse, d'un délai faible pour la transmission des données et d'une bonne sécurité. Une structure de serveur de consultation (Browse Server) à trois niveaux est utilisée pour développer ce système en évaluation sensorielle. Leurs utilisateurs, incluant les fabricants en produits finis ou semi-finis, tel que les producteurs de tissus ou encore de fils pour la chaîne logistique textile par exemple, mais aussi les agents de vente, les experts en évaluation qualité et les consommateurs, peuvent facilement accéder à la consultation par le navigateur Internet Explorer® (IE) et ce depuis n'importe quel endroit. La structure du serveur de consultation fournit aussi les commodités pour une gestion à distance. Matlab® est utilisé pour réaliser l'ensemble des calculs à partir des données sensorielles recueillies selon la collection de méthodes mises au point par nos soins. En utilisant le CGI¹⁷, le serveur de Matlab est autorisé à recevoir des données sensorielles provenant de pages web et d'appeler les programmes correspondants pour poursuivre l'analyse de ces dernières. Une interface de ODBC (Open DataBase Connectivity) est utilisée pour transmettre les résultats d'analyse à la base de données du serveur SQL (Standard Query Language).

¹⁷ Common Gateway Interface

La Figure 43 présente les principaux modules du système web intelligent pour le domaine de l'évaluation sensorielle. Le système est composé de trois sous-systèmes : le sous-système de la gestion du projet, le sous-système réservé à la collection de méthodes dédiées aux professionnels de l'évaluation sensorielle (DOSE : Design-Oriented Sensory Evaluation) et le sous-système réservé à l'analyse des données du marché (MOSE : Market Oriented Sensory Evaluation).

Un projet se définit par rapport à une collection d'échantillons appelés à être transformés au sein de la chaîne d'approvisionnement. Le sous-système de la gestion du projet est utilisé pour surveiller et gérer les projets en évaluation sensorielle. Il permet aux partenaires de la chaîne de créer, de modifier et de supprimer à la fois les projets de DOSE et de MOSE. Quand un projet du DOSE est créé, nous devons enregistrer les informations relatives à la nature du projet, à son application, aux termes qui seront employés, ainsi qu'au format de ces termes. A la création d'un projet du MOSE, nous devons non seulement enregistrer les informations sur la nature du projet, mais aussi générer les questionnaires en fonction des applications spécifiques du MOSE.

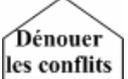
Le sous-système du DOSE est composé d'un module de collection de données (Data Collection Module), d'un module de normalisation des données (Data Normalization Module), d'un module d'analyse de données (Data Analysis Module), d'un module de résolution des conflits (Conflicts Solver Module), et d'un module d'entraînement du panel (Panel Training Module). Dans le module de collection des données sensorielles, nous bâtissons deux interfaces pour les utilisateurs. La première permet de collecter les données auprès d'évaluateurs individuels par le biais d'Internet. Ces évaluateurs individuels sont souvent considérés comme les principaux experts des produits concernés. La seconde interface est plutôt destinée à collecter par lots les données sensorielles recueillies par un panel, donc un groupe de techniciens travaillant au sein d'une entreprise. Dans le module de normalisation des données, nous implantons un modèle flou linguistique pour normaliser et agréger les données sensorielles au sein de chaque panel en utilisant la méthode présentée dans la section 2.3.3. Dans le module d'analyse de performances, nous calculons les distances entre les panels et entre les termes, ainsi que les degrés de sensibilité des panels et des termes. Ces valeurs peuvent être utilisées pour juger de la qualité de chaque panel, de décider de nouvelles séances d'entraînement pour le panel ou d'un de ses membres en particulier et d'évaluer la pertinence de chaque terme utilisé ainsi que de fournir un rapport sur la qualité des produits. Dans le module de résolution des conflits, nous estimons les distances entre les termes d'évaluations utilisées par deux partenaires différents de la chaîne, tels qu'un fournisseur et une entreprise cliente. Dès lors nous pouvons déterminer la relation entre ces termes afin de comprendre les termes employés par un partenaire au travers de ceux de l'autre. On peut ainsi contrôler si les deux partenaires possèdent la même définition des termes communs qu'ils emploient. Dans le module d'entraînement du panel, nous pouvons utiliser les procédés proposés pour augmenter la qualité des panels d'évaluation. Les résultats historiques d'évaluation de l'entraînement sont enregistrés dans la base de données afin de maintenir la qualité des membres du panel.

Le sous-système du MOSE est composé de son propre module de collection des données, du module de criblage de données (Data Filtration Module) pour ne retenir que les clients potentiels (par le biais d'une analyse factorielle) et du module d'analyse de la performance. Dans le module de collection de données, deux interfaces pour les utilisateurs sont développées. La première est destinée à collecter les données de la part des consommateurs individuels par internet. Il correspond aux deux situations suivantes : 1) les consommateurs évaluent à la maison les échantillons envoyés par les organisateurs de l'évaluation et retournent leurs résultats par Internet ; 2) les consommateurs sélectionnés sont invités pour évaluer des échantillons dans les conditions contrôlés d'un laboratoire sensoriel et alors

Partie 2 : Présentation des thèmes de recherche

soumettent leurs résultats par internet. La seconde interface est conçue pour collecter les données par lots. Elle correspond au cas où les organisateurs de l'évaluation reçoivent des enquêteurs les réponses de consommateurs à des questionnaires prédéfinis. Le module de criblage des données est utilisé pour sélectionner les résultats d'évaluation des consommateurs finaux et potentiels à partir des réponses fournies dans les questionnaires. Dans le module d'analyse de performances, nous calculons les distances entre les termes du MOSE et les degrés de sensibilité de ces termes afin de contrôler la qualité des résultats d'évaluation. Dans le module de résolution des conflits, nous pouvons dénouer les conflits qui souvent surviennent entre les départements de Recherche et Développement et le département Marketing des entreprises.

Actuellement, toute l'architecture des tables de données est en place avec la collection de méthodes prêtes. Au niveau de l'interface d'acquisition des données sensorielles, nous nous sommes rapprochés dans le cadre d'un Master Recherche [D9] de l'équipe dirigée par Mme Bouchon-Meunier pour aménager une interface déjà développée au Laboratoire d'Informatique de Paris 6 sous Java et l'adapter au contexte de l'évaluation sensorielle des matériaux textiles.

Symbol	Signification
	flux de produit
	flux informationnel de la demande
	Modèle pour rattacher A à B
DOSE XY	Design-Oriented Sensory Evaluation X: entreprise réalisant l'évaluation Y: produit devant être évalué Type d'entreprise : 1 producteur de fil 2 producteur de tissu 3 producteur de vêtement Type de produit : 1 fil 2 tissu 3 habit
PF	usine de production
DC	Centre de conception
DMC	Centre de prise de décision
PP	Paramètres de réglage du procédé
	flux d'information de l'évaluation
	flux décisionnel
	Zone de conflits entre clients et fournisseurs
MOSE XY	Market-Oriented Sensory Evaluation X : entreprise réalisant l'évaluation Y : marché cible type d'entreprise : 1 producteur de fil 2 producteur de tissu

	3 producteur de vêtement Marché cible : 1 France 2 Belgique 3 Chine
QC	centre qualité
MAC	centre d'analyse du marché
TM	marché cible

Tableau 11 : Description des symboles utilisés dans la Figure 2

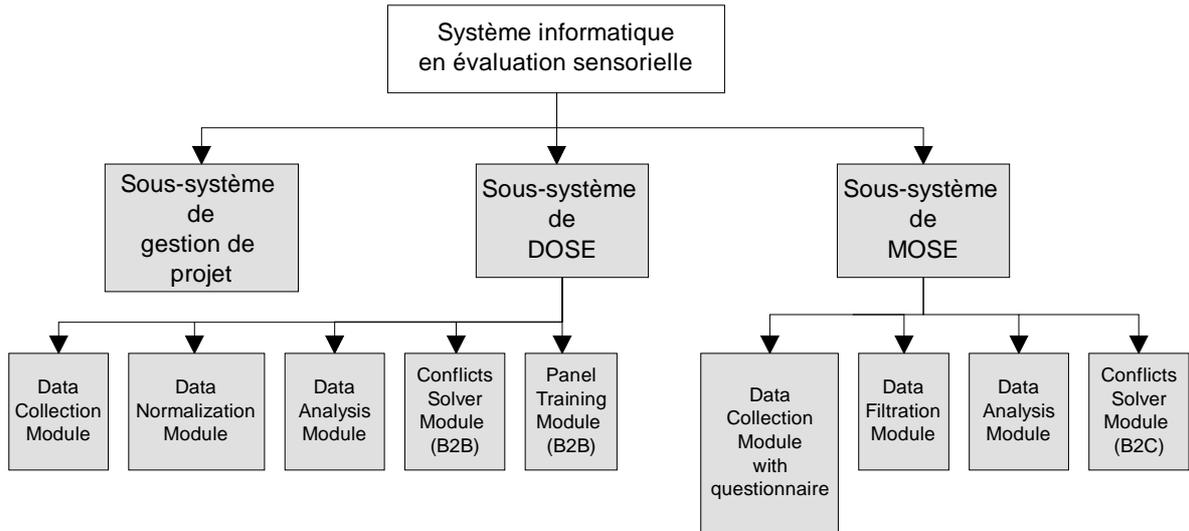


Figure 43 : Principaux modules du système web adapté à l'évaluation sensorielle des produits

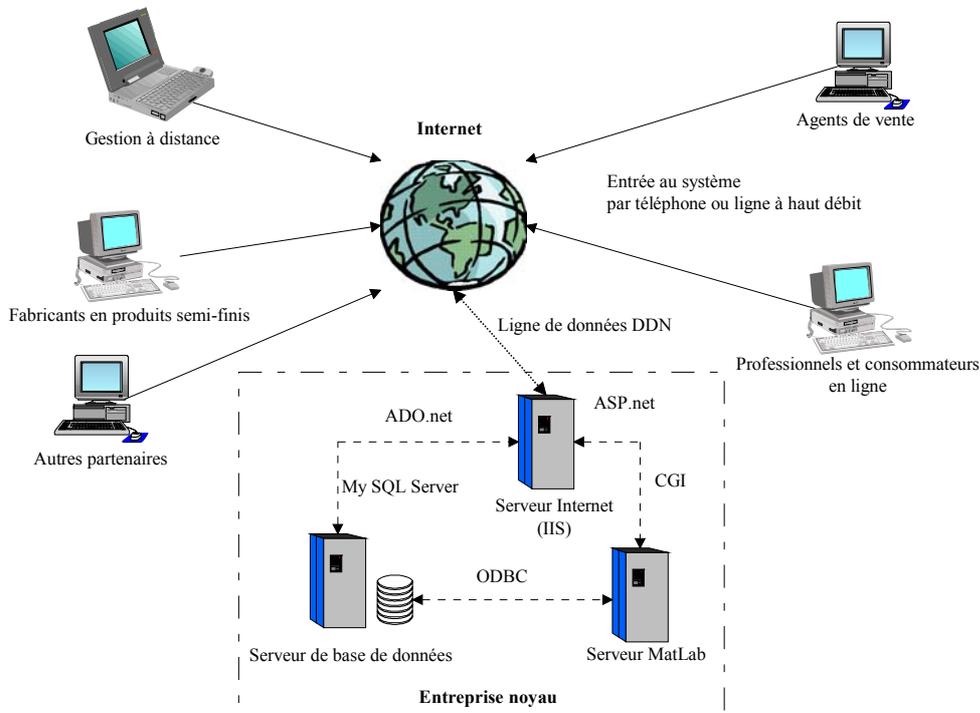


Figure 44 : Réalisation du Système WEB d'évaluation sensorielle dans une chaîne logistique intégrée

2.3.8 Analyse et discussion

Avec la compétition internationale de marché de plus en plus intensive que nous connaissons actuellement, comment fournir une forte réactivité au marché, comment satisfaire les besoins des consommateurs, comment accroître le taux de pénétration du marché sont autant de questions attendant des réponses de la part des entreprises. Le 21^{ème} siècle est une période de compétition très forte sur le partage des parts de marché. Le maintien et le renforcement du lien entre les consommateurs et les produits deviennent des facteurs essentiels dans la réussite de l'entreprise. Dans ce contexte où les activités des entreprises se développent autour de la préférence de consommateurs, l'évaluation sensorielle peut être prise comme un outil d'exploration du marché, capable de quantifier et de qualifier la perception humaine ressentie par les consommateurs. La préférence des consommateurs et la tendance du marché peuvent être identifiées par une analyse de données sensorielle pertinente. Par conséquent, l'évaluation sensorielle joue un rôle très important dans le contrôle qualité, la conception et le développement des produits industriels ainsi que dans le traitement des relations entre partenaires de la chaîne d'approvisionnement des produits. Bien que l'évaluation sensorielle ne constitue pas encore, pour le moment, un système complet au niveau théorique, ses applications sont déjà étendues depuis le secteur agro-alimentaire vers les industries cosmétiques, pharmaceutiques, textiles, automobiles, chimiques, etc... En même temps, elle offre de nouvelles pistes de recherche à la communauté scientifique.

Notre contribution aux méthodes d'analyse sensorielles constitue la mise à disposition d'une collection d'outils intelligents alliés à des connaissances en Sciences de l'Information et en Génie Textile pour faire de la recherche sur les méthodes de collection des données sensorielles, de leur normalisation et de leur analyse. Les résultats des travaux de recherche rencontreront indéniablement des applications pratiques. Ces travaux peuvent être un outil d'aide à la décision pour aider les entreprises à parfaire la mise au point de produits en fonction de la préférence des consommateurs. Au cours des travaux de recherche, nous avons conduit un grand nombre de collections de données dans des pays distincts (en France et en Chine), auprès d'acteurs tous différents issus de secteurs d'activités eux aussi différents. Cette richesse dans la collection de données, nous a fourni une base solide pour la structuration des données et la définition des outils adaptés à leur analyse. De plus, cela garantit la valeur pratique des travaux dans le contexte d'une chaîne d'approvisionnement intégrée et mondiale.

Les contributions principales de ce thème peuvent se résumer ci-dessous :

(1) A partir d'observations réelles des séances d'évaluations sensorielles en entreprise, nous avons fait la distinction entre les facteurs primordiaux impliqués dans ce domaine. Basée sur cette analyse, nous avons montré l'intérêt de la mise en place d'une structure à deux niveaux pour l'évaluation sensorielle et donnons les définitions des DOSE (Design-Oriented Sensory Evaluation) et MOSE (Market-Oriented Sensory Evaluation). Ce découpage en deux niveaux est original et il nous permet de contribuer à une meilleure compréhension sur les modes d'évaluations sensorielles tels qu'ils sont utilisés actuellement. Nous avons par ailleurs illustré cette structure hiérarchique au travers d'une application réelle en utilisant un exemple emprunté au domaine de l'industrie textile.

(2) Nous avons appliqué un modèle flou linguistique qui peut être utilisé pour unifier des informations linguistiques multi granulaires en minimisant la perte d'informations. A l'aide de ce modèle, les données sensorielles issues d'individus distincts pour différents descripteurs peuvent être normalisées sur une échelle commune afin de fournir la donnée normalisée pour l'étape de l'analyse.

(3) Nous avons proposé une théorie d'analyse de données sensorielles du concepteur des produits jusqu'au client. Selon la variation de données, nous proposons les formules de calcul pour analyser la distance et la sensibilité de données sensorielles. Pour interpréter en termes

linguistiques plus proches du raisonnement humain les résultats des calculs, nous traitons la distance et la sensibilité avec la méthode floue. Ensuite, nous proposons un modèle pour calculer la corrélation entre les termes des évaluations. Sur la base des critères et des modèles ci-dessus, nous avons répertorié les moyens d'accroître la qualité de l'évaluation par les DOSE.

(4) La structure particulière des données du MOSE, nous a conduit à définir une méthode originale de traitement de données dite de 'Compensation des couples'. Cette méthode a pour avantage de surmonter les défauts auxquels sont confrontés les statistiques classiques pour calculer les dissemblances entre deux distributions en présence de plusieurs maxima locaux. A l'instar des techniques proposées pour le DOSE, nous sommes en mesure d'estimer les distances et les sensibilités entre termes du MOSE pour le qualifier. Ceci permet non seulement de développer plus rapidement des produits en conformité avec les attentes des consommateurs tout en sachant en interne les évaluer. D'autre part, cela permet de limiter les conflits qui peuvent surgir entre les départements de Recherche et Développement et le département Marketing et de prévoir à terme la préférence des consommateurs correspondant à un nouveau produit. Ce thème sera approfondi par une évaluation plus poussée du modèle proposé en termes de robustesse afin d'améliorer la qualité de ce modèle et d'aider la conception de nouveaux produits.

(5) En liaison avec nos compétences acquises dans le cadre du premier thème, nous sommes désormais en mesure de mettre en place et de comprendre les corrélations qui existent entre les impressions humaines ressenties au niveau du contact des matériaux et les mesures instrumentales qui peuvent être conduites sur ces même matériaux en remontant jusqu'au paramètres de structure pour les matériaux textiles ou encore le réglage des procédés de transformation. Ce dernier point est en mesure d'offrir aux industriels un outil intéressant pour traduire le plus fidèlement possible la qualité sensoriel de leur produits dans un cahier des charges et surtout de diminuer les temps de conception de leur produits.

PARTIE III
PERSPECTIVES

3 PERSPECTIVES DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Dans le cadre de la personnalisation de masse des produits industriels et pour apporter une aide à la conception, nous souhaiterions développer deux grandes pistes de recherche dans un très proche avenir. La première piste s'inscrit dans la fusion de données au sens du confort des produits alors que la seconde a trait à la substitution d'un sens, en particulier celui du toucher, par un autre sens celui de l'apparence. Ces deux démarches permettent de fournir des informations pertinentes pour l'aide à la décision en intégrant un ensemble de variables caractéristiques liés à la qualité des produits.

Comme nous l'avons vu dans le développement de la section 2.2, le comportement d'un système complexe peut être caractérisé par un ensemble de variables mesurables. La qualité et le confort d'un produit peuvent être caractérisés par un ensemble de variables extraites à partir d'images en utilisant les techniques de la transformée de Fourier, de la représentation en ondelettes, de la géométrie fractale, etc. Dans le confort textile, la qualité perçue du confort est caractérisée par une combinaison pertinente des différents aspects sensoriels comprenant le toucher des étoffes, la couleur, le style ainsi que les différents paramètres physiques des composants textiles. En général, les données mesurées sur les variables caractéristiques du système permettent d'identifier et de comprendre les différents modes de son fonctionnement. Ces variables caractéristiques comprennent non seulement des grandeurs numériques issues des mesures physiques, mais aussi des descripteurs linguistiques issus de la connaissance spécialisée des experts. L'intégration de l'ensemble de ces variables caractéristiques permet de fournir des informations pertinentes pour l'aide à la décision. La possibilité d'intégration des interactions et de l'importance entre critères est rendue possible grâce à l'utilisation d'une forme simplifiée de l'Intégrale de Choquet basée sur les mesures floues. Cette approche permet en outre de prendre en compte des observations expérimentales et le savoir-faire des experts en qualité des produits industriels et de la production afin de déterminer, mais aussi d'évaluer les interactions entre variables. Pour cette nouvelle perspective à nos travaux, nous avons déposé une candidature dans le cadre de l'appel à projets GRAISyHM pour la campagne 2007-2008 où nous comptons travailler en partenariat avec trois autres équipes afin de développer un ensemble de méthodes permettant d'analyser le comportement du système complexe en utilisant les techniques intelligentes (cf. section 1.5.2). La mise en œuvre d'un classement des produits sur la base d'un ensemble de critères souvent contradictoires et présentant des synergies (positives ou négatives) entre eux est un problème complexe. Mais une fois obtenu, celui-ci permet de déterminer les conditions opératoires du processus permettant d'optimiser le produit ou la tâche à appliquer. A terme, pour chacune des applications, nous proposerons la construction d'un index multicritère global d'évaluation. Les techniques d'agrégation des indicateurs sont nombreuses, car il n'existe pas de méthode unique. La pertinence de la méthode d'analyse multicritère proposée sera évaluée selon sa capacité à traiter des données qualitatives et quantitatives, la possibilité d'incrémenter aisément le nombre de critères sélectionnés, la possibilité de tester la sensibilité des résultats à des variations des données d'entrée et sa flexibilité à s'adapter à différents contextes d'application. Les résultats de nos travaux seront appliqués à différents contextes industriels tels que le textile, l'automobile, ou l'industrie chimique. Nous nous appuyerons sur nos précédents travaux concernant l'extraction et formalisation des variables caractérisant un aspect spécifique du système afin de définir une liste exhaustive de tous les attributs caractérisant le comportement du système complexe et de formaliser mathématiquement les variables décrivant ces attributs en utilisant la logique floue et le réseau sémantique pour la formalisation des variables linguistiques. A la suite de l'étape de sélection de variables

pertinentes pour éliminer les variables redondantes et non significatives selon leur sensibilité au comportement du système et la connaissance humaine des experts, nous souhaitons fusionner des données numériques et linguistiques pour construire un critère de qualité global caractérisant le comportement du système pour l'aide à la décision.

Nos travaux réalisés dans le thème 2 nous ont permis d'acquérir une bonne compétence dans l'exploitation des évaluations sensorielles issues de panels professionnels et de consommateurs. Notre souhait aujourd'hui concerne l'intégration dans la qualité de différents aspects sensoriels afin de générer des nouveaux paramètres de conception de produits et d'étudier des relations entre les différentes sensations ressenties humainement. En cela, les études du thème 1, nous ont également amené à extraire des paramètres pertinents à partir d'images statiques et dynamiques et nous conduisent à bien comprendre les phénomènes de surface et l'analyse de la texture et des structures des matériaux textiles. Dans l'étape de conception des produits, l'évaluation sensorielle joue un rôle de plus en plus important dans l'industrie textile au niveau de la qualité. C'est une technologie permettant de relier la production au marketing et à la conception par des techniques de traitement de l'information humaine. Elle permet de faciliter des transactions commerciales entre les clients et les fournisseurs et de créer des plates-formes pour la normalisation et la communication entre les partenaires industriels sur la qualité des produits. Pour le moment, des études sur l'évaluation sensorielle des produits s'effectuent généralement pour un aspect particulier (toucher, couleur, odorat, ...). Nous disposons à ce jour d'outils performants pour évaluer séparément quelques sens, en particulier le sens du toucher ou la couleur. La substitution sensorielle est une nouvelle étape qui comprend un ensemble des techniques et des dispositifs permettant des conversions des sens entre eux afin de faciliter la communication humaine avec son environnement. Les applications principales de cette technologie sont des systèmes d'aide pour les handicapés. A titre d'exemple, les systèmes d'aide aux aveugles peuvent produire les effets visuels à partir des signaux liés au toucher, au transfert de masse et de chaleur et à l'ouïe. La modélisation et la simulation des étoffes permettent de synthétiser des images tridimensionnelles statiques (cf. Figure 45) et séquentielles des surfaces textiles à partir de leurs propriétés physiques (cf. Figure 46). Ces images synthétisées comprennent souvent une part importante des informations sur le toucher textile. La simulation du tomber de l'étoffe nous renseigne sur son drapé, sa flexibilité ou encore nous retourne une information sur sa masse surfacique, tandis qu'une image de synthèse statique est capable de nous apporter des informations concernant son état de surface (rugosité, pilosité, glissant, ...). La combinaison de ces deux types d'images séquentielles et statiques sont capables de nous transmettre sensoriellement une information beaucoup plus riche que celle liée simplement à la coupe et au style du matériau. Afin de répondre dans les meilleurs délais à leurs clients, en étant proche d'eux tout en leur offrant une réponse conforme à leurs attentes et rapidement intégrable dans la chaîne d'approvisionnement, le média Internet est un support très privilégié car il fournit une très grande flexibilité. Aujourd'hui, les transactions des produits textiles par Internet sont essentiellement encore basées sur la transmission des images statiques et séquentielles décrivant l'apparence, la couleur et le style du produit. Nous savons que, pour autant, ces informations ne sont pas les seules à participer à la décision d'achat du consommateur. La qualité du toucher du produit est aussi un vecteur primordial pour le développement de la vente de produits textiles à distance. Les clients sont pour l'instant incapables de caractériser tous les aspects sensoriels sur la qualité des produits et il leur est donc encore difficile de choisir des produits adaptés à leur préférence personnelle. Dans ce contexte, nos travaux à l'avenir ont pour objectif de développer un système permettant de substituer le toucher textile par la combinaison d'autres aspects sensoriels qui peuvent être véhiculés par Internet, comme la couleur, l'apparence, la texture ou le drapé. Ce système doit permettre d'extraire des

informations tactiles à partir des images et de générer des images statiques ou dynamiques comprenant des informations tactiles. Sa structure et ses paramètres seront déterminés ou ajustés par l'évaluation sensorielle d'une collection représentative d'échantillons et par l'apprentissage des données sensorielles correspondantes. Le secteur de distribution peut dans une large mesure en bénéficier dans la vente par correspondance, notamment par le biais de ventes en ligne, mais au final ce sont tous les acteurs de la chaîne de transformation qui pourraient bénéficier d'une méthode de substitution d'un sens par un autre sens pour véhiculer à moindre coût une information non dégradée pendant la phase de conception et de réalisation des produits. Un apport fort en recherche est requis pour mener à leur terme le développement d'une procédure permettant de convertir des informations tactiles en informations visuelles sur des images synthétiques construites à partir de mesures physiques réalisées sur les étoffes en liaison avec les évaluations sensorielles des experts ou encore le développement de procédure permettant d'extraire des informations tactiles à partir des images et de mesurer l'inclusion d'information tactile contenue dans une image ou une séquence vidéo. Dans le cadre du projet Duo-France/Japon, nous accueillons actuellement depuis mars 2006 et pour un séjour d'une durée de sept mois un Professeur invité, M. Yosuke Horiba et un étudiant au niveau Master, Masaki Hagiwara de l'Université de Shinshu (cf. section 1.4.2). Leurs travaux s'inscrivent dans la perspective de la substitution sensorielle du toucher par l'apparence. A partir d'images et de séquences vidéo de synthèse calculées selon les caractéristiques mécaniques d'une collection d'étoffes, ils évaluent sensoriellement par le biais d'un panel l'inclusion d'information qui existe entre l'évaluation de l'impression humaine ressentie au travers des images statiques et dynamiques et l'apparence des échantillons réels. Ces travaux guident nos premiers pas dans cette seconde perspective.



Figure 45 : image de synthèse d'un tissu avant et après calibration de la couleur et de la réflectance



Figure 46 : image de synthèse du drapé d'un tissu calculée à partir de paramètres mécaniques mesurés

4 CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire présente la synthèse de mes activités en enseignement, en fonctions administratives et mes travaux de recherche depuis septembre 1994, jusqu'à ce jour, soit du démarrage de ma thèse jusqu'à mes fonctions actuelles au sein de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles de Roubaix dans l'équipe "Aide à la conception pour la qualité des produits et procédés textiles". Mes activités de recherche développées en automatique et les thématiques abordées sont le fruit de ma forte motivation personnelle, mais pas uniquement. Ils ont pris leur source à la fois dans une interaction étroite avec les autres membres de l'équipe, la collaboration avec d'autres équipes impliquées dans les mêmes thématiques, mais aussi grâce à l'observation et à l'écoute des attentes des acteurs économiques engagés dans les processus de conception personnalisée des produits textiles en terme de qualité et de confort. La conjonction de ces sources m'ont amené à apporter ma contribution dans le domaine de l'exploitation de données physiques et de la connaissance humaine et à m'ouvrir des perspectives pour continuer à proposer des informations pertinentes pour l'aide à la décision en associant un ensemble de variables qualitatives et quantitatives liées à la qualité et au confort des produits textiles manufacturés.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

A

- [ABE-95] S. Abe et M-S. Lan, Fuzzy Rules Extraction Directly from Numerical Data for Function Approximation, IEEE Trans. On Syst., Man, and Cybernetics, Vol. 25 No 1, p. 119-129 - (1995)
- [AND-96] A.N Anderson, A.B. McBratney, and E.A.FitzPatrick, Soil Mass, Surface, and Spectral fractal Dimensions Estimated from Thin Section Photographs, Soil Sci. Soc. Am. J, vol 60 (1996) pp 962-969

B

- [BAK-96] S. Bakke and P.E. Øren, 3-d pore-scale modelling of heterogeneous sandstone reservoir rocks and quantitative analysis of the architecture, geometry and spatial continuity of the pore network, spe 35479. In European 3-D Reservoir Modelling Conference, Stavanger, Norway, SPE (1996) 35–45
- [BAT-94] R. Battiti, Using mutual information for selecting features in supervised neural net learning, IEEE Trans on Neural Networks, Vol. 5, No. 4, July 1994, pp. 537-550
- [BIG-96] M. Bigerelle et A. Iost, Calcul de la dimension fractale d'un profil par la méthode des autocorrélations moyennées normées (AMN), C.R. Acad. Sci. Paris, tome 323, Série Iib, p. 669-675 (1996)
- [BLU-91] M.J. Blunt and P. King, Relative permeabilities from two- and three-dimensional pore-scale network modelling, Transport in Porous Media, 6 (1991) 407–433
- [BLU-95] M.J. Blunt and H. Sher, Pore network modeling of wetting, Physical Review E, 52 (December 1995) 63-87
- [BOU-95] B. Bouchon-Meunier, La logique floue et ses applications, Addison-Wesley France - (1995)

C

- [CAR-03] C. Cardie, Using decision trees to improve case-based learning, Proceedings 11th International Conference on Machine Learning (2003), Amherst, MA, pp. 25-32
- [CAS-95] J.L. Castro, Fuzzy Logic Controllers Are Universal Approximators, IEEE Trans. On Syst., Man, and Cybernetics, Vol. 25 No 4, p. 629-634 - (1995)
- [CHR-99] P.K. Chrysanthis, T.F. Znati, S. Banerjee and S.K. Chang, Establishing virtual enterprises by means of mobile agents, Proceedings of the Research Issues in Data Engineering Workshop, Sydney, Australia, March 1999, pp. 116-123
- [COC-57] WG Cochran and GM Cox, Experimental designs, 2nd ed. Wiley, New York

D

- [DEL-99a] J-F. Delerue, E. Perrier, A. Timmerman, M. Rieu, and K.U. Leuven, New computer tools to quantify 3D porous structures in relation with hydraulic properties, In J. Feyen and K. Wiyo, editors, Modelling of transport processes in soils, Wageningen Pers, The Netherlands, (1999) 153–163
- [DEL-99b] J-F. Delerue, E. Perrier, Z.Y. Yu, and B. Velde, New algorithms in 3D image analysis and their application to the measurement of a spatialized pore size distribution in soils, Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 24(7) (1999) 639–644
- [DEL-02] J-F Delerue and E. Perrier. DXSoil, a library for 3D image analysis in soil science, Computer & Geosciences, 28 (2002) 1041–1050
- [DEN-93] M. Denesuk, G.L. Smith, B.J.J. Zelinski, N.J. Kreidl and D.R. Uhlmann, Capillary Penetration of Liquid Droplets into a Porous Materials, Journal of Colloid and Interface Science, 158 (1993) 114-120

- [DIJ-97] G.B. Dijksterhuis, *Multivariate Data Analysis in Sensory and Consumer Science*, Food & Nutrition Press Inc., Trumbull, Connecticut 06611 USA, 1997
- [DUB-89] B. Dubuc, J. F. Quiniou, C. Roques-Carmes, C. Tricot and S. W. Zucker, Evaluating the Fractal Dimension of Profiles, *Physical Review A*, Vol. 39, Nb 3 p. 1500-1512 - (Fevrier 1989)

F

- [FAT-56] I. Fatt, The network model of porous media I. capillary pressure characteristics, *AIME Petroleum Transactions*, vol. 207 (1956) p. 144
- [FUK-90] K. Fukunaga, *Introduction to Statistical Pattern Recognition*, 2nd edition San Diego, CA, USA, Academic (1990)

H

- [HER-93] Herbert Stone and Joel Sidel, *Sensory Evaluation Practices (Second Edition)*, Tragon Corporation, Redwood City, CA, USA (1993)
- [HER-01] F. Herrera and L. Martizez, A model based on linguistic 2-tuples for dealing with multigranular hierarchical linguistic contexts in multi-expert decision-making, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics*, 2001, 31(2): 227-234
- [HID-02] Hidajat, A. Rastogi, M. Singh, and K. Nohanty Transport properties of porous media reconstructed from thinsections. *SPE Journal*, (March 2002) 40–48
- [HU-00] Hu J, Vhen W and Newton A, A psychophysical model for objective fabric hand evaluation: an application of Steven's law, *Journal of the Textile Institute*, 84(3), 1993, pp.354-363
- [HUA-94] Q. Huang, J.R. Lorch and R.C. Dubes, Can the Fractal Dimension of Images be measured?, *Pattern Recognition*, Vol. 27, nb 3, p. 339-349 - (1994)

K

- [KAW-96] S. Kawabata and M. Niwa, Objective measurement of fabric hand, In: Raheel M, Dekker M (eds) *Modern Textile Characterization Methods*, 1996, pp 329-354.
- [KE-00] Ke H. and Ding L., *Market research and analysis*, China Statistic Press, 2000

L

- [LAS-01] M. Last, A. Kandel and O. Maimon, “Information-theoretic algorithm for feature selection,” *Pattern Recognition Letters* 22 (2001) pp. 799-811
- [LIN-99] W. B. Lindquist and A. Venkatarangan, Investigating 3D geometry of porous media from high resolution images, *Phys. Chem. Earth (A)*, 25(7):(1999) pp. 593–599
- [LOH-89] J.B. Lohmoller, *Latent Variable Path Modeling with Partial Least Squares*, Berlin, Germany, Physica-Verlag (1989)

M

- [MAN-89] B. Mandelbrot, *Les objets fractals : forme, hasard et dimension*, 3^{ème} édition, Flammarion - (1989)
- [MAM-75] E.H. Mamdani and S. Assilian, “An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller,” *Int. J. of Man-Machine Studies* 7 (1975) pp. 1-13
- [MAR-92] A. Marmur, Penetration and Displacement in Capillary Systems, *Advances in Colloid and Interface Science*, 39 (1992) 13-33
- [MAR-97] A. Marmur, R.D. Cohen, “Characterization of Porous Media by the Kinetics of Liquid Penetration: The Vertical Capillaries Model”, *Journal and Colloid and Interface Science*, 189 (1997) 299-304

[MCB-94] A.B M^c Bratney and C.J. Moran. Soil pore structure modelling using fuzzy random pseudo fractal sets, International working meeting on soil micromorphology, pp.495-506, 1994

[MIC-92] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag, seconde édition étendue - (1992)

N

[NAJ-89] K. Najim, Process modelling and control in chemical engineering, Marcel Dekker, New-York, 1989

[NAJ-91] K. Najim and G. Oppenheim, Learning systems: theory and application, IEEE Proceedings-E, Vol. 138, No. 4, July 1991

O

[ØRE-98] P. E. Øren, S. Bakke, and O. J. Arntzen. Extending predictive capabilities to network models. SPE Journal, (December 1998) 324–336

P

[PAR-00] Park SW, Hwang YG and Kang BC, “Applying fuzzy logic and neural networks to total hand evaluation of knitted fabrics”, Textile Research Journal, 70(8), 2000, pp.675-681

[PEA-93] Peace GS., Taguchi methods: a hands-on approach, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA, USA (1993)

[PEN-01] J.M. Pena, J.A. Lozano, P. Larranaga and I. Inza, “Dimensionality reduction in unsupervised learning of conditional Gaussian networks,” IEEE Trans. on PAMI 23(6) (2001) pp. 590-603

[PER-00] A. Perwelz, P.Mondon, C. Caze, Experimental study of capillary flow in yarns, Textile Research Journal, 70(4), (2000) 333-339

[PER-01] A. Perwelz, M. Cassetta, C. Caze, Liquid organisation during capillary rise in yarns-influence of yarn torsion, Polymer testing, 20 (2001) 553-561

[POU-96] Pourdeyhimi, B. and Ramanathan, R., Measuring Fiber Orientation in Nonwovens Part II: Direct Tracking, Textile Research Journal, 12 (1996) 747-753

[POU-97] Pourdeyhimi, B., Dent, R., and Davis, H., Measuring Fiber Orientation in nonwovens Part III: Fourier Transform, Textile Research Journal, 2 (1997) 143-151

[PUK-93] Pukelsheim F., Optimal design of experiments, John Wiley & Sons, New York, New York, USA (1993)

Q

[QIN-86] J.R. Quinlan, Induction of decision trees, Machine Learning 1(1) (1986) pp. 81-106

R

[REB-95] Rebenfeld, L. and miller, B., Using Liquid Flow to Quantify the Pore Structure of Fibrous Materials, J.Text.Inst., 2 (1995) 241-251.

[ROL-05] Roland Berger strategy consultants, [WWW] <http://www.rolandberger.com/> (updated on February 16, 2006)

T

[TAK-85] T. Takagi and M. Sugeno, Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control, IEEE Trans. On Syst., Man, and Cybernetics, Vol. SMC-15 No 1, p. 116-132 - (1985)

[TAK-97] H. Takagi, Introduction to fuzzy systems, neural networks and genetic algorithms, in the collection of Intelligent Hybrid Systems edited by D. Ruan, Kluwer Academic Publishers, 1997, pp. 3-34

[THA-97] R. Thawonmas and S. Abe, A novel approach to feature selection based on analysis of class regions, IEEE Trans on SMC – Part B: Cybernetics, Vol. 27, No. 2, 1997, pp. 196-207

[TSE-61] M.L. Tsetlin, On the behaviour of finite automata in random media, Avtomatika i Telemekhanika 22, p. 1345-1354 - (1961)

[TON-80] R.M. Tong, The evaluation of fuzzy models derived from experimental data, Fuzzy sets and Systems 4, p. 1-12 - (1980)

[TRI-88] C. Tricot, J.F. Quiniou, D. Wehbi, C. Roques-Carmes et B. Dubuc, Evaluation de la dimension fractale d'un graphe, Revue de Phys. Appl. 23, p. 111-124 - (1988)

V

[VEN-00] Arun Venkatarangan, W. Brent Lindquist, John Dunsmuir, and Teng-Fong Wong. Pore and throat size distributions measured from synchrotron x-ray tomographic images of Fontainebleau sandstones. Journal of Geophysical Research – Solid Earth, 105(9) (2000) 21509–21527

W

[WAL-01] W.E. Walsh, Market Protocols for Decentralized Supply Chain Formation, A Ph. D. Dissertation, The University of Michigan, 2001

[WAN-92] L-X. Wang et J.M. Mendel, Generating Fuzzy Rules by Learning from Examples, IEEE Trans. On Syst., Man, and Cybernetics, Vol. 22 No 6, p. 1414-1427 - (1992)

[WAS-21] Washburn, E., Phys. Rev. 17 (1921) 273.

Z

[ZAD-65] L.A. Zadeh, Fuzzy Sets, Inform.and Control 8, p. 338-353 - (1965)

[ZAD-73] L.A. Zadeh, Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision process, IEEE-Trans. On SMC, vol. 3, No. 1, Jan. 1973

[ZEN, 00a] X. Zeng, C. Vasseur, F. Fayala, Modeling micro geometric structures of porous media with a predominant axis for predicting diffusive flow in capillaries, Applied Mathematical Modelling, vol. 24 (2000) pp 969-986.

[ZEN-00b] X. Zeng, J. Zhou et C. Vasseur, A strategy for controlling nonlinear systems using learning automata, Automatica, vol. 36, 2000, pp. 1517-1524

[ZHO-02] B. Zhou, LH. Lin, LR. Ren, YS. Ding, Nucleus Enterprise Supply Chain Management System Based on Enterprise Dynamic Alliance, Computer engineering and application, 2002, 38(17): 224-226

ANNEXE

ANNEXE

Proposal for a Double Degree Program Between ENSAIT, France and Shinshu University, Japan

The objective of this proposal is to put into place a Double Degree Program at Master's level between the 2 institutes.

It should be noted that at Shinshu University, students complete a Bachelor Degree after 4 years of study, and the Master Degree is completed in 2 years.

At the ENSAIT, students complete 3 years of study (after 2 years of preparation classes or 2 to 3 years undergraduate study) in order to obtain an Engineering title, equivalent to a Masters Degree.

Taking into account the academic structures in each country, the following Double Degree program has been developed between the 2 institutes. The framework has been discussed, the content of the Double Degree will be put into place at a later date.

In order to obtain 2 degrees, 1 from each university, an extra period of study will be necessary for all students participating. This will be of 1 semester (6 months). Given that the student will obtain the degree from both institutes, this proposal will be submitted to the CTI (Commission des Titres d'Ingénieurs) in France and the respective body in Japan for approval.

Students from Shinshu University to ENSAIT:

The student will complete the first year of the Master's Degree Program in Shinshu University and then carry out 1.5 years at the ENSAIT. The student will receive the 'Diplôme d'Ingénieur' equivalent to a Masters Degree from the ENSAIT and a M.S. from Shinshu University.

Students from ENSAIT to Shinshu University:

The student will complete the first two years of the academic program at the ENSAIT and then carry out 1.5 years at Shinshu University. The student will receive the M.S. from Shinshu University and 'Diplôme d'Ingénieur' equivalent to a Masters Degree from the ENSAIT.

Selection of students will take place 6 months to 1 year before the beginning of the Double Degree program. Linguistic and cultural preparation for study abroad will be built into the program to allow for maximum integration into the partner institute. Students will continue to take language and cultural classes during the program in the host institute.

Both parties agree that the program will be reviewed and evaluated after two years and necessary changes will be made. It could perhaps be necessary to include an additional semester at the beginning of the program for language and cultural preparation in the host country.

French Educational System v.s. Japanese Educational System

French System:

Students pursuing higher education will either go to University or Grandes Ecoles. 99% of them will enter the university system and 1% will go to scientific preparation schools for access to the "Grandes Ecoles" –Engineering Institutes where they study intensive science courses which include chemistry, physics, mathematics, foreign languages (English and German or Spanish) for 2 years.

Students will then sit the national competitive examination for entrance to the Grandes Ecoles. This exam can be taken only twice. Each Grandes Ecoles school sets its own

threshold of entrance according to exam statistics, the number of students wanting to enter and capacity to accept. There are 300 Grandes Ecoles in France and ENSAIT is ranked 32nd. ENSAIT is one of the leading Textile Engineering Institutes in Europe, training around 100 graduate textile engineers each year.

The Grandes Ecoles requires a total of three years of study. So in total it will take five years after graduating from high school. One semester of study at the Grandes Ecoles is equivalent to 30 credits, 1 year of study is equivalent to 60 credits (ECTS). If students fail, they can resit a year only once throughout their study program. Thus, the maximum study can not exceed 4 years in the Grandes Ecoles

Japanese System:

Students pursuing higher education in Japan go to university. The admission to a university requires passing an entrance examination. The entrance exam consists of both a nationwide exam and a university exam. Both scores are combined. In general each department sets the number it can accept and selects that number of students according to the score they have. The same applies to MS students, who will take the entrance exam in order to do a 2 year master Program.

Educational Systems

ENSAIT			vs.	Shinshu Univ.		
		MS Degree				MS Degree
Year 5	Semester 10 Semester 9	Projects		Year 6	Semester 12 Semester 11	Mostly R. Projects
Year 4	Semester 8 Semester 7	BS Level		Year 5	Semester 10 Semester 9	Projects & Classes
Year 3	Semester 6 Semester 5	Enter ENSAIT		Year 4	Semester 8 Semester 7	
Year 2	Semester 4 Semester 3	Preparation Classes		Year 3	Semester 6 Semester 5	
Year 1	Semester 2 Semester 1	Scientific Training		Year 2	Semester 4 Semester 3	
		Highschool Diploma		Year 1	Semester 2 Semester 1	Enter SHINSHU

Spring semester: Feb 1st->June 30th Spring semester: April 1st->July 31st
 Fall semester: Sept. 1st -> Jan 31st Fall semester: Oct. 1st -> Jan 31st
 A student from Shinshu University can skip a year

Procedure

The International Office of each institute will oversee the DD program.

The content of the Double Degree program will be developed with the Studies Director and the International Relations Office in each institute.

Each participating student will sign a study agreement which will be accepted and signed by the sending institution, student and host institution. The paper will include course number, course title and units.

Each student will have an academic supervisor in the host and in the sending institution.

Instructors of courses will assess the accomplishment of the student.

Course Requirements for students involved in the Double Diploma program

1. Courses

Necessary to focus on courses which complement each institutes' strengths and weaknesses.

Encourage students to get involved in DD

Make sure that all courses the students wish to take are available for the particular semester of study, to ensure that there are no problems with course clashes or courses not offered in a semester. (Administrator's responsibility)

Major and minor courses

Have to be flexible with requirements: units of lectures, seminars, experiments (but aware that it is a national degree which is being awarded so course content must be approved)

1) Lectures

2) Final Year Project

The final semester is devoted to a Final Year Project. This project can be done in partnership with textile companies in France (for Japanese students) and in Japan (for French students). Projects will be at the level of graduate school.

In France the Final Year Project is worth 30 credits and lasts for a minimum of 20 weeks). Evaluation of the project is based on the industrial tutor's appreciation of the student during the project, the written report (English or French at the ENSAIT) and the oral presentation of the student. The Project will be defended by the student in the host institute in front of a jury of academics (and industrial tutor if possible). The Jury can include a Faculty Member from the student's Home Institution.

3) Foreign Language courses (French or Japanese)

To complete the ENSAIT degree, students have to obtain the B2 level in English (750 points in the TOEIC). Before entering the DD with Shinshu University, ENSAIT students must obtain the B2 Level in English. ENSAIT students must also have followed Japanese lessons at the ENSAIT. In Shinshu University, ENSAIT students will receive Japanese courses and make sure they reach at least the B1 level (to be checked).

For Japanese students who will apply for the DD program, they must take French lessons to obtain the TEF in Japan to ensure that they can follow lessons in French at the ENSAIT. In order to graduate from the ENSAIT, they will have to obtain at least 550 points in the TOEIC. In France, they will receive French courses to ensure they reach the B2 level in French.

Linguistic preparation:

- Japanese: Shinshu will provide Japanese courses for beginners.
- French: ENSAIT will provide intensive French courses for beginners.

2. Instructional Language

The instructional language should be, in the majority, in the language of the host institute as the student will obtain the degree from the host institute as well as the home institute. However both institutes are also able to facilitate exchange and offer courses in English.

For Shinshu University, seminar type classes, projects are easy to offer in English.

The ENSAIT can provide some courses in English, and try to mix with French. Projects can be offered in English. Encourage Japanese student to apply for projects in France.

3. Required Units

Both parties will fully recognize the courses offered and the grades given. The course workload for 1.5 years of study is as follows:

- ENSAIT students going to Shinshu University will take 22 units of courses including projects, seminars and practical work.

- Shinshu University students going to the ENSAIT will take 90 European credits.

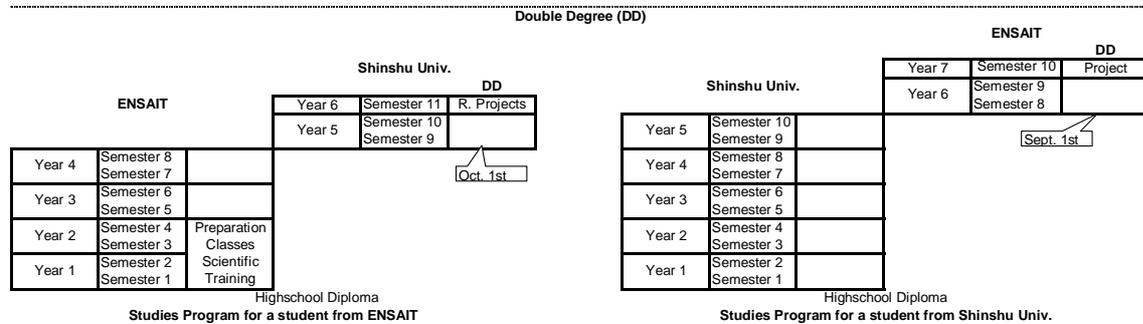
More than 1/3 of credits are dedicated to projects which are carried out in the company.

4. Period of Study

ENSAIT students going to Shinshu will take a year and a half to complete the DD program.

Shinshu students going to ENSAIT will take a year and a half to complete the program.

Both parties allow one additional year to complete. In both Institutes, a student involved in the DD program can re-take a year only once. The students will receive both degrees at the same time.



To Do List

1. Draw up new Agreement

Points to be clarified

1) Exemption of tuition

Have to get approval for tuition exemption

2) In Shinshu, students of ENSAIT will receive Japanese courses and make sure they reach at least B1 level (to be checked).

3) Shall we ask to our students from both sides to write their end-year project in both languages (french & japanese)? –Depends on decision between the 2 institutes, for example students can also defend their project in Japanese in Shinshu after their stay in France. From both sides, we are quite convinced that reports could be written in English or in language of the host institution and the oral presentation could be performed in language of the host institution.