

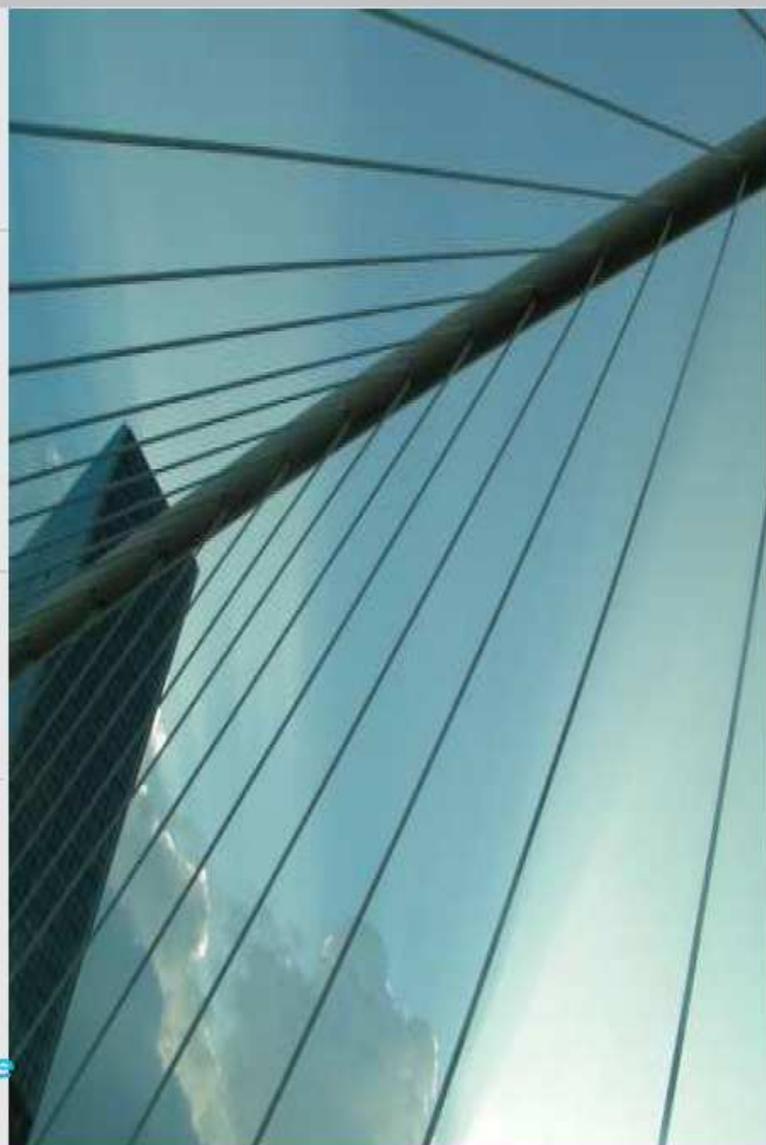
JOURNAL NATIONAL DE LA RECHERCHE EN IUT

05 Aide à la décision
multicritère et orientation
des étudiants en IUT
Antoine Rolland

12 Quel marketing dans
une économie de la
contribution ? Pour un
dialogue entre
marketing et sociologie
du travail
Renaud Garcia-Bardidia

18 La dénomination des
commerciaux : une
identité à revisiter ?
Anne Parizot

25 Vers une nouvelle
appréhension du
comportement du
consommateur face à
un nouveau produit :
Une approche
exploratoire qualitative
Achraf Sellami



<i>Aide à la décision multicritère et orientation des étudiants en IUT</i> Antoine Rolland	P. 7
<i>Quel marketing dans une économie de la contribution ? Pour un dialogue entre marketing et sociologie du travail</i> Renaud Garcia-Bardidia	P. 16
<i>La dénomination des commerciaux : une identité à revisiter ?</i> Anne Parizot	P. 24
<i>Vers une nouvelle appréhension du comportement du consommateur face à un nouveau produit : une approche exploratoire qualitative</i> Achraf Sellami	P. 33
<i>Logiques de réseautage : différences culturelles entre la France et la Chine</i> Pei Liu	P. 48
<i>La PSBT optique: Un candidat sérieux pour augmenter le débit sur les installations existantes</i> Farouk Khecib, Olivier Latry, Mohamed Ketata	P. 55
<i>Estimation récursive de la densité pour un processus fortement mélangeant</i>	P. 65

Aboubacar Amiri <i>Un facteur d'échelle de dureté en nano et microindentation</i>	p. 74
Johnny Mendoza, Francine Roudet, Jacky Lesage et Didier Chicot <i>Néphélomètre polaire à double polarisation : incertitude et validation des mesures</i>	P. 83
Christophe Verhaege, Pascal Personne, Valery Shcherbakov, Jean-François Gayet <i>Conception et mise en forme de nouveaux matériaux à partir de macromolécules naturelles</i>	P. 99
Lucie Crépy, Patrick Martin, Nicolas Joly <i>Sondes capacitives intégrées aux bagues de roulements pour la mesure des efforts statiques et dynamiques</i>	P. 110
Patrick Marconnet, Bernard Pottier, Lanto Rasolofondraibe, Danielle Nuzillard <i>Morphologie des copeaux à grande vitesse</i>	P. 124
Gautier LIST, Guy SUTTER, Xuefeng BI <i>Etude comparative des performances des Micro-antennes implantables et antennes de surface: Applications en Micro-spectroscopie RMN localisée</i>	P. 135

L. Fakri-Bouchet, A. Kadjo, A.
Briguet, D. Graveron-Demilly

P. 149

*Aide à la Conception de Systèmes
Instrumentés de Sécurité utilisant
les composants sur étagère et les
réseaux de fiabilité*

Frédérique Bicking, Christophe
Simon

*Modèle sûr de fonctionnement du
wagon intelligent de ferroutage*

Joffrey Clarhaut, Saïd Hayat, Blaise
Conrard, Vincent Cocquempot

P. 162

*Trampoline : un support pour le
développement d'applications temps
réel*

Jean-Luc Béchenec, Mikaël Briday,
Sébastien Faucou, Pierre Molinaro,
Yvon Trinquet

P. 173

*Simulation des processus
moléculaires à la surface de la
glace. Cas de la photodissociation
de la molécule HCl.*

Stéphane Briquez, Maurice
Monnerville, Brigitte Pouilly,
Céline Toubin, Sylvain Woittequand

P. 182

*Les indicateurs de gaz à effet de
serre implicites des produits de la
pêche commerciale*

Isabelle Dangeard, Pascal Le
Floc'h

Suivi automatisé et modélisation de la cinétique de germination de grains de maïs par traitement d'images couleur P. 194

Alain Clément, Bertrand Vigouroux

Evaluation de l'activité anti-Listeria de textiles fonctionnalisés : suivi microbiologique et état physiologique de Listeria innocua P. 203

Elise Chadeau, Nadia Oulahal,
Emna Jelassi & Pascal Degraeve

Aide à la décision multicritère et orientation des étudiants en IUT

Antoine Rolland

*IUT Evry – Université Evry Val d’Essonne
Département Qualité, Logistique Industrielle et Organisation
Cours Monseigneur Romero, 91000 Evry*

a.rolland@iut.univ-evry.fr

Sections de rattachement : 27

Secteur : Secondaire et Tertiaire

RESUME : *La comparaison d’étudiants en vue d’un classement est un problème classique résolu en prenant la moyenne des notes de chaque étudiant. Or de nombreux résultats en aide à la décision multicritère montrent que la moyenne n’est pas toujours la meilleure méthode pour classer des alternatives de profils variés. Nous proposons une autre méthode originale, basée sur la comparaison ordinale des étudiants à des profils de référence. Nous présentons succinctement la méthode avant de discuter de l’influence des paramètres dans les résultats obtenus.*

MOTS-CLÉS : *aide multicritère à la décision, classement.*

Introduction

L'évaluation des étudiants à l'IUT s'effectue suivant le mode du contrôle continu. Les notes sont ensuite synthétisées en une moyenne par module. Les modules sont ensuite regroupés en UE. Il existe trois UE en deuxième année de QLIO : UE1, enseignement général; UE2, enseignement technique; UE3, pratique professionnelle. L'étudiant obtient son diplôme s'il satisfait les conditions suivantes : avoir plus de 10 en moyenne générale des modules et avoir plus de 8 en moyenne à chaque UE. Il n'est pas établi de classement officiel de sortie de l'IUT. Chaque étudiant valide son diplôme ou non. Cependant, de nombreux étudiants souhaitent poursuivre leurs études (licences professionnelles, master, écoles d'ingénieur...) et remplissent à cet effet des dossiers de candidatures. Sur ces dossiers, il est souvent demandé le rang de l'étudiant dans la promotion. Dans le système scolaire français, la comparaison de deux étudiants repose uniquement

sur la comparaison de la moyenne des notes obtenues au cours des différentes évaluations de leur formation. Cependant, la moyenne est un critère extrêmement réducteur, et dans le domaine de l'aide multicritère à la décision il est connu que, bien qu'elle soit un des modes d'agrégation les plus utilisés¹, c'est aussi l'un des plus mauvais. En effet, la moyenne gomme toute différence entre les différents profils d'alternatives (ici des étudiants) que l'on souhaite comparer.

Exemple : Prenons 3 étudiants de DUT secondaire, ayant respectivement en UE d'enseignement général, d'enseignement technique et de pratique professionnelle les notes présentées dans le tableau ci-dessous.

étudiant	UE1	UE2	UE3
A	12	8	10
B	6	6	18
C	15	11	4

Pour chacun, la moyenne générale est de 10. Mais il est clair que les trois étudiants n'ont absolument pas le même profil, et qu'il est difficile d'obtenir un classement absolu entre les trois. En effet, dans le cadre d'une poursuite d'étude vers une école d'ingénieur, on aura tendance à privilégier les étudiants bons dans les matières théoriques, et ainsi le classement pourra être C préféré à A, lui-même préféré à B. A contrario, pour une poursuite d'étude professionnalisante, on mettra plus l'accent sur les compétences professionnelles de l'étudiant, et le classement pourrait être alors A préféré à B, lui-même préféré à C.

Les différentes filières de poursuites d'études nécessitent des équilibres différents entre les modules, afin de valoriser les modules requis pour les études souhaitées. La moyenne générale n'étant alors pas la solution la plus pertinente, d'autres méthodes pourraient être judicieusement mises à profit pour la comparaison des étudiants. En particulier, l'introduction d'une comparaison ordinale multicritère, c'est à dire basée sur la position relative des étudiants, permet d'élargir les possibilités offertes par la simple utilisation de la moyenne. De même, l'introduction de niveaux de référence dans une procédure de comparaison doit permettre d'affiner les comparaisons en vue de l'objectif poursuivi. C'est pourquoi nous proposons une nouvelle méthode utilisant une

¹ y compris dans les formations universitaires en décision multicritère ! Mais c'est une obligation légale.

procédure d'agrégation ordinale avec points de référence pour le classement des étudiants.

Comparaison ordinale multicritère

2.1 Décision multicritère

En décision multicritère (voir par exemple Roy et al 1993, Scharlig 1985, Vincke 1989), on suppose que les différentes alternatives se présentant au décideur peuvent être décrites sur un certain nombre de critères. Les valeurs des alternatives sur ces critères représentent la prise en compte de points de vue diversifiés, en général non réductibles à un seul critère. Par exemple, lors du choix d'un projet industriel, nous pouvons considérer les points de vue économiques, sociaux, environnementaux, etc : un projet relativement bon suivant un critère le sera souvent beaucoup moins suivant un autre critère. La difficulté est d'arriver à obtenir une comparaison relative des alternatives, afin de guider le choix du décideur vers la solution qui lui paraîtra optimale. En effet, la notion d'optimisation "dans l'absolu" est vide de sens en décision multicritère, car il n'existe généralement pas d'alternative optimisant tous les critères simultanément. Il est donc nécessaire de prendre en compte de l'information supplémentaire, en particulier l'importance relative de chaque critère et les relations existantes entre les différents critères. Il existe une grande diversité d'approches et de modèles en théorie de la décision multicritère. Cet état de fait est justifié par la grande variété des situations pratiques dans lesquelles le décideur peut se trouver.

A partir de ces différents paramètres, il est possible de choisir la méthode la plus adaptée au cas étudié : dans notre cas, nous sommes en présence d'un ensemble discret d'alternatives définies en extension, d'un effectif faible (une trentaine), et nous disposons d'une information à la base cardinale.

Deux voies différentes peuvent être envisagées pour agréger les différentes valeurs des critères de deux alternatives à comparer :

- la voie "agréger puis comparer":

Il s'agit, pour chaque alternative, d'agréger toutes les valeurs prises sur chacun des critères pour obtenir un "score" unique pour chacune des alternatives, un critère unique de synthèse. Il suffit ensuite pour comparer deux alternatives de comparer leurs scores respectifs. La théorie des méthodes basées sur la définition d'un critère unique de synthèse (une fonction d'utilité, ou MultiAttribute Utility Theory, MAUT) a été développée depuis les années 70 principalement aux Etats-

Unis (voir Keeney et al 1976). C'est la méthode utilisée quand on effectue la moyenne, éventuellement pondérée, des notes des étudiants avant de les comparer entre eux. Cette approche est relativement simple et intuitive dans le contexte où les alternatives sont en nombres finis ou dénombrables. Comme cette approche est totalement compensatoire, il est nécessaire de connaître quelle performance sur un critère peut compenser une performance sur un autre critère. Ces informations ne sont pas toujours évidentes à obtenir, en particulier dans le cas où les critères sont évalués sur des échelles différentes.

- la voie "comparer puis agréger".

Il s'agit ici au contraire de comparer, critère par critère, les deux alternatives afin d'obtenir autant de relations de préférence partielles entre les deux alternatives qu'il existe de critères, puis d'essayer d'agréger ces préférences partielles en une préférence globale à l'aide d'une procédure d'agrégation s'apparentant à un vote. La méthode ELECTRE, proposée par Roy 68, est la plus ancienne des méthodes d'aide multicritère à la décision utilisant ce principe. Cette méthode a connu de nombreuses variantes et développements pratiques en aide à la décision.

Points de référence

L'utilisation de points de référence est déjà présente dans le domaine de l'aide à la décision multicritère : point cible à atteindre dans le cas de l'optimisation multicritère, limite de catégorie pour trier des alternatives... Nous proposons pour notre part d'utiliser des points de référence pour aider à la comparaison d'alternatives de manière indirecte ; en effet, la comparaison directe des alternatives deux à deux induit des relations de préférence qui ne sont pas forcément transitives : c'est le paradoxe de Condorcet. D'autres part, certaines relations de préférence observées chez certains décideurs montrent que les décideurs raisonnent parfois par rapport à des « niveaux de référence » à atteindre, et non en considérant simplement des performances absolues.

La méthode que nous proposons (Rolland 2006, 2008) consiste à comparer chaque alternative (ici, un étudiant) à un point de référence (ici, un profil type fixé à l'avance) sur chacun des critères (ici, les notes obtenues pour chaque UE). Nous obtenons alors l'ensemble des critères pour lesquels l'alternative est préférée au point de référence. Nous pouvons alors comparer, pour deux alternatives, ces deux ensembles afin d'obtenir une relation de préférence entre les deux alternatives vis-à-vis du point de référence. Si la relation obtenue n'est pas assez fine, il est possible de prendre plusieurs points de référence afin d'obtenir plusieurs relations de préférence vis-à-vis de points de référence. Il s'agit ensuite d'agréger ces relations de préférence en une relation globale, la seule procédure d'agrégation garantissant une relation transitive à la fin étant l'agrégation suivant un ordre lexicographique sur les points de référence : on commence par prendre la relation donnée par le premier point de référence, que

l'on raffine pour les alternatives considérées comme indifférentes par la relation obtenue vis-à-vis d'un deuxième point de référence, et ainsi de suite.

Nous proposons dans le chapitre suivant une application de cette méthode au cas de la poursuite d'étude d'étudiants en IUT, avec discussion sur les paramètres de la méthode.

Application à l'orientation des étudiants en poursuite d'études

Afin de tester nos procédures, nous avons écrit un programme sous VBA pour Excel, permettant une présentation visuelle simple des relations de préférence sur les 26 étudiants par un tableau. L'avantage présenté par Excel est qu'il est très simple de rentrer des données sous forme de tableaux. Une fois les données des étudiants rentrées, nous pouvons agir sur trois paramètres :

- les points de référence : vu le faible nombre d'alternatives (26), nous avons choisi de prendre deux points de référence. Un résultat théorique a montré que, sans perte de généralité, nous pouvions supposer que les points de référence se dominent les uns les autres. Nous nous sommes donc limités à étudier des procédures basées sur des points de référence se dominant.
- les procédures d'agrégation pour obtenir les relations de préférences vis-à-vis de chaque point de référence. Il s'agit ici de déterminer la valeur de chaque coalition de critère afin d'obtenir une relation de préférence sur l'espace des coalitions.
- la procédure d'agrégation finale permettant d'obtenir la relation de préférence globale à partir des relations de préférence vis-à-vis de chaque point de référence : nous avons étudié ici une agrégation basée sur un ordre lexicographique sur les points de référence. Cela nous permet d'obtenir une relation de préférence finale transitive.

Le programme réalisé permet de faire varier les trois paramètres pour obtenir la relation de préférence recherchée.

Classements obtenus à l'aide des points de référence

Nous présentons dans cette section les résultats de l'application des différentes procédures au corpus d'alternatives. La méthode classique pour obtenir un classement à partir de plusieurs notes consiste à prendre comme score pour chacun des étudiants la moyenne des notes, éventuellement pondérée par un coefficient. L'application de cette procédure au corpus considéré nous donne les résultats détaillés dans le tableau 1.

Résultats de base obtenus à l'aide de la procédure avec deux points de référence

Nous avons pris comme points de référence initiaux les points $p_1=(12,12,12,12)$ et $p_2=(14,14,14,14)$. Pour obtenir une relation de préférence vis-à-vis d'un point de référence, il est nécessaire de choisir une procédure d'agrégation des comparaisons effectuées critère par critère.

Etudiant	G	S	T	P	Moyenne	Rang
A	12,72	14,51	14,19	14,40	13,95	3
B	7,15	6,78	7,25	6,13	6,83	26
C	10,75	11,99	11,51	11,52	11,44	17
D	12,17	13,65	13,15	13,20	13,04	7
E	14,49	14,61	13,37	14,23	14,17	2
F	14,90	9,75	12,89	15,74	13,32	5
G	9,96	9,99	11,31	14,40	11,42	18
H	11,17	12,17	10,09	14,27	11,92	13
I	12,81	11,46	11,62	11,24	11,78	14
J	12,86	13,68	11,95	12,43	12,73	8
K	12,89	13,01	13,72	15,68	13,83	4
L	10,07	9,18	9,66	13,48	10,6	21
M	10,26	11,74	11,62	13,01	11,66	16
N	10,52	9,83	13,02	11,63	11,25	19
O	10,25	9,98	11,05	10,95	10,55	22
P	10,48	8,50	10,63	9,7	9,84	25
Q	11,53	12,21	12,28	12,70	12,18	11
R	11,61	10,83	10,55	13,99	11,75	15
S	10,47	10,21	10,17	12,00	10,71	20
T	10,28	10,25	10,25	11,17	10,49	23
U	9,60	10,28	10,75	11,26	10,47	24
V	10,69	13,67	11,15	13,08	12,15	12
W	11,91	13,04	11,72	13,67	12,59	9
X	12,14	13,04	12,02	15,39	13,15	6
Y	12,10	15,91	14,42	14,67	14,28	1
Z	11,57	13,64	12,64	12,47	12,58	10

Tableau 1. Liste des étudiants et classement à partir de la moyenne générale

rang						
1	A	E	Y			
2	K	X				
3	D					
4	F					
5	J	Q	Z			
6	H					
7	V	W				
8	G					
9	I	L	M	N	R	S
10	B	C	O	P	T	U

Tableau 2. Classement des étudiants - modèle de référence

Nous avons retenu la procédure consistant à affecter le même poids à chaque critère, ce qui donne comme règle d'agrégation la règle majoritaire : l'alternative a est préférée à l'alternative b par rapport au point de référence p si le nombre de critère où a est meilleure que p est plus important que le nombre de critère où b est meilleure que p . La relation de préférence obtenue est détaillée en table 2. Elle est naturellement transitive et possède 10 classes d'indifférence. Elle est relativement discriminante sur la première moitié des alternatives, mais possède ensuite 2 classes d'indifférence avec 6 alternatives chacune. Elle ne distingue pas les trois premières alternatives. La relation obtenue n'est pas très différente de la relation obtenue à partir de la moyenne (environ 15 % de différence). Cependant, on peut noter que les trois premiers étudiants du classement sont indifférents pour la relation de préférence considérée, de même les 6 derniers, et que l'étudiant F gagne quelques places grâce à sa relative régularité, qui n'est pas pénalisée par les sciences vu le caractère non compensatoire de la procédure.

Influence du niveau des points de référence

Nous avons fixé les points de référence à des niveaux arbitraires pour notre classement de référence. Une des interrogations est alors de savoir si la relation de préférence obtenue varie de manière importante pour des niveaux différents. De manière générale, le niveau des points de référence a bien évidemment une influence sur le classement final. Cependant, ce n'est pas tant le niveau absolu des points de référence qui agit sur le caractère plus ou moins discriminatoire d'un classement, mais bien l'adéquation du niveau de référence aux alternatives que l'on souhaite discriminer. Par exemple, si l'on considère la tête du classement obtenu, nous constatons que le point de référence à 14 ou 14,5 permet de mieux

discriminer les alternatives qu'un point de référence à 13,5 ou 15. Si les points de référence sont trop en décalage par rapport aux alternatives à comparer (dominant toutes les alternatives, ou étant dominés par toutes les alternatives), la relation de préférence obtenue est alors très pauvre, i.e. contient de grandes classes d'équivalence. Il est donc important, si l'on souhaite obtenir une relation discriminante, de ne pas fixer les niveaux des points de référence a priori mais de les adapter au corpus des alternatives à comparer. On pourrait aussi introduire plus de deux points de référence. Cependant, la charge supplémentaire (paramètres à fixer, temps de calcul allongé...) liée au rajout un point de référence ne se justifie par forcément s'il ne s'agit au final de ne discriminer que deux alternatives qui étaient jusque là restées équivalentes. En pratique, nous pensons qu'au delà de trois points de référence la précision supplémentaire obtenue ne justifie pas le surcroît de calculs.

Influence de la relation d'importance sur les coalitions de critères

La relation d'importance choisie pour comparer les coalitions de critères possède bien entendu une influence sur le classement final. Cependant, la relation d'importance sur les coalitions de critères est fortement contrainte quand le nombre de critères est faible, et que l'on souhaite conserver la propriété de monotonie par inclusion sur les ensembles de critères. Elle ne peut donc pas être un grand vecteur de changement au sein de la relation de préférence.

Influence de l'ordre d'agrégation final

L'ordre de l'agrégation des relations de préférence vis-à-vis de chaque point de référence est important pour discriminer les alternatives qui sont difficilement comparables directement, en particulier les alternatives très équilibrées et celles très déséquilibrées. De manière générale, une agrégation commençant par les points de référence de haut niveau va favoriser les alternatives ayant au moins une très bonne note sur un critère, même si elles sont déséquilibrées. A contrario, si l'agrégation commence par les points de référence de bas niveau, les alternatives relativement équilibrées, c'est-à-dire ne possédant pas de mauvaises performances vont être favorisées. Enfin, commencer par le point de référence médian permet de séparer facilement le corpus en deux sous-groupes identifiables comme étant pour l'un celui des "bonnes" alternatives, et l'autre celui des "mauvaises" qu'il n'y a plus qu'à affiner ensuite.

Conclusion

Nous avons montré l'intérêt d'utiliser d'autres procédures que la moyenne pour classer les étudiants en vue d'une poursuite d'étude, et nous avons montré l'influence des différents paramètres sur le classement final. Dans cette perspective, nous envisageons de développer un module d'aide à la décision permettant d'exploiter efficacement ces nouvelles procédures.

Bibliographie

Keeney, R. L. et Raiffa, H, *Decision with multiple objectives : preferences and value tradeoffs*, New-York, J. Wiley, 1976.

Rolland A., « Points de référence en décision multicritère », *Actes de la 7^{ème} conférence ROADEF*, Lille, 2006, presses universitaires de Valenciennes, p. 153-167.

Rolland A, Procédures d'agrégation ordinale de préférences avec points de référence pour l'aide multicritère à la décision, thèse de doctorat, 2008

Roy, B., « Classement et choix en présence de point de vue multiples », *Les cahiers du CERO*, n°8, 1968, p. 57-75.

Roy, B., et Bouyssou, D, *Aide Multicritère à la décision*, Paris, Economica, 1993.

Scharlig, A, *Décider sur plusieurs critères*, Presses Polytech. Universitaires Romandes, 1985.

Vincke, P., *L'aide multicritère à la décision*, Ellipses, 1989.



Antoine ROLLAND, 36 ans, est agrégé de mathématique et docteur en informatique. il exerce en tant que PRAG au département Qualité et Logistique Industrielle de l'IUT d'Evry-Val d'Essonne. Ses travaux de recherche portent sur les processus d'agrégation de préférences en décision multicritère, décision dans l'incertain et théorie du choix social.

***Quel marketing dans une économie de la contribution ?
Pour un dialogue entre marketing et sociologie du
travail***

Renaud Garcia-Bardidia

IUT Hubert Curien – Université Nancy 2
Département Techniques de Commercialisation
7 rue des Fusillés de la Résistance BP 392 88010 Epinal Cedex

Renaud.Garcia-Bardidia@univ-nancy2.fr

**Section de rattachement : 6
Secteur : Tertiaire**

RESUME : *L'émergence d'une économie de la contribution où les consommateurs occupent de plus en plus un rôle de producteur des biens et services qu'ils utilisent met le marketing face à un possible changement de paradigme. Ce papier tente d'en éclaircir certains enjeux en faisant dialoguer les approches de cette mutation proposées en économie et en sociologie et les résultats de deux études empiriques menées sur les carrières de « téléchargeurs » et des joueurs en ligne sur Second Life. Les compétences observées en contexte, ainsi que les techniques d'auto-promotion mises en place par les répondants indiquent alors que le marketing, loin de disparaître, pourrait tendre à se dissoudre dans le travail des consommateurs, à l'instar de son extension généralisée dans une société de consommateurs.*

MOTS-CLÉS : *Internet, interactions sociales, consommateurs-producteurs, carrières, hybridation*

Introduction

Sous l'effet de nouvelles contraintes économiques, sociales, environnementales ou politiques, le marketing semble à l'heure de questionnements majeurs se manifestant par les mouvements de résistance des consommateurs, autant que par les nombreux papiers en proposant un changement de paradigme (Cova, Badot et Bucci, 2006).

Face à cet impératif de réflexivité, le dialogue interdisciplinaire est souvent

d'une grande aide. Or la sociologie de la consommation, la sociologie du travail et le marketing constatent tous trois l'émergence d'une économie de la contribution, propre à modifier grandement les principes du marketing. Pourtant, il est frappant de constater l'écart apparent entre les approches et les visions défendues.

Dans ce cadre, nous nous proposons de revenir brièvement sur les évolutions du marketing et les facteurs l'affectant. Nous rappellerons ensuite les théories sociologiques et économiques formalisant l'économie de la contribution et postulant la disparition du marketing. Nous procéderons alors à une comparaison de résultats empiriques sur deux terrains qui en sont caractéristiques avec ces propositions pour conclure à l'hybridation de différents modèles remettant potentiellement en cause non l'existence du marketing mais la position de ses professionnels.

1. Evolutions du marketing : entre double élargissement et crise de légitimité ?

Depuis sa création dans les années vingt, le marketing a vu évoluer ses fondements, ses objectifs et ses pratiques. A l'heure actuelle, il semble avoir atteint un nouveau stade, qu'éclaire une brève relecture historique de ces mutations.

Certaines tendances sont ainsi communément admises. Le périmètre d'action du marketing s'est considérablement élargi, intégrant progressivement les différents secteurs commerciaux, puis ceux à but non lucratif, tout en participant du mouvement d'internationalisation de l'économie (Kotler et Dubois, 1997). Ses objectifs ont largement évolué entre les premières approches du marketing transactionnel, l'effort d'organisation du marketing management, et le changement paradigmatique induit par le marketing relationnel (Gronröos, 1997), ou plus récemment par une extension de ses actions à l'ensemble des mécanismes sociaux (Cova, Badot et Bucci, 2006). Sont maintenant inclus dans ces propositions, les collaborateurs, la clientèle ou les autres parties prenantes des marchés, partiellement intégrés de ce fait à l'entreprise. Il devient moins important, au moins dans les discours, de vendre que de personnaliser, de fidéliser et de fédérer des réseaux (Kotler et Dubois, 1997). En parallèle, ses fondements théoriques ont intégré progressivement les apports de l'économie, de la psychologie, de la sociologie, de la physique des réseaux ou des mathématiques (Filser, 1994). Le marketing a donc connu un double élargissement : élargissement thématique du gestionnaire au sociétal et épistémologique de l'hypothético-déductif au qualitatif/interprétatif (Cochoy, 1999). Ces évolutions se retrouvent dans les résultats du projet Galileo, mené conjointement par l'Association Française de Marketing et l'Institut de Recherche et d'Etudes Publicitaires (2008). Trois thèmes y sont décrits comme essentiels pour une recherche appliquée en phase avec les préoccupations des entreprises : les dimensions sociétales comme commerciales de la relation entre l'entreprise et ses différents partenaires ; l'amélioration du lien entre croissance

et innovation, notamment par la co-création des innovations menées par les consommateurs ; l'am elioration des mesures de l'efficacité du marketing autour de nouvelles conceptions de la valeur.

Diff erentes explications de ces évolutions ont été proposées. Les pratiques marketing sont soumises aux mêmes contraintes de cycle de vie que les produits. S'ensuit par effet d'entraînement, une sophistication des techniques portée par la « valse des intermédiaires », découlant de la mise en marché de savoirs formalisés et spécialisés du travail marchand par ses professionnels (Cochoy, 1999). Les Technologies de l'Information et de la Communication ont de même révolutionné les modes de vente, de communication et de création, permettant l'émergence de nouveaux modèles économiques et une participation accrue des consommateurs (Tapscott et Williams, 2006). Mais plus qu'une simple modification des moyens disponibles, c'est sans doute une modification profonde de l'économie à l'heure de l'immatériel et de la numérisation qu'il faut envisager (Gorz, 2003). De la même manière, l'importance des enjeux écologiques questionne le marketing. Peut-il être un outil de sensibilisation et de responsabilisation efficace, particulièrement dans le cadre de la citoyenneté des entreprises, tout en favorisant une consommation exacerbée ? L  encore, les mouvements de critique et de protestation sont forts, engendrant de ce fait un courant de recherche sur la résistance.

Finalement, on mesure le chemin parcouru, en termes de formalisation, de sophistication, et d'extension. Dans une société de consommateurs, le marketing est devenu un moyen d'action sociétale essentiel tout en perdant une part de sa légitimité du fait de sa diffusion.

2. Vers une disparition du marketing dans l'économie de la contribution ?

L' conomie et la sociologie s'interrogent actuellement sur l'émergence d'un capitalisme cognitif porté par des consommateurs plus actifs et innovants que les professionnels, appelant le marketing à disparaître. Pour estimer la valeur de ces affirmations, il convient de revenir sur ce que serait cette économie de la contribution, ses conditions d'apparition, ses enjeux et sa réalisation actuelle.

L' conomie de la contribution rassemble l'ensemble des technologies relationnelles émergentes qui permettent de générer de la valeur en dépassant le modèle consumériste-productiviste issu du capitalisme industriel. Elle se situe à la croisée des questions de la gratuité, du numérique, de la société de la connaissance et de la tertiarisation de l'économie, sans être réductible à ces phénomènes. Elle suppose la montée des phénomènes d'innovation ascendante (Von Hippel, 2005) et l'apparition de la figure du professionnel-amateur (Leadbeater et Miller, 2004). La frontière entre la production de l'entreprise et celle des consommateurs s'y brouille, sous l'effet d'une mise au travail spécifique par auto-production dirigée ou par captation du travail collaboratif

(Dujarier, 2008), ou d'une auto-organisation liée au monde du libre, dont le « hacker » est un idéal (Himanen, 2001).

Ces nouvelles relations découleraient des compétences communicationnelles de la « génération Internet » (Strauss et Howe, 1991), d'un désir d'expression et de sublimation en réponse à la surstimulation (Stiegler, 2008), et plus simplement de l'élévation du niveau général d'éducation et de la diffusion des compétences issues du libre (Moulier Boutang, 2007). S'y ajoutent les effets des nouvelles technologies, notamment la reproductibilité à l'infini des produits immatériels. La baisse tendancielle du profit amène à favoriser l'innovation et l'immatériel, ce qui renforce l'intérêt de l'auto-production, de l'utilisation du savoir vivant et de sa mise en réseau (Moulier Boutang, 2007). Se crée alors une économie de quasi-biens non rivaux (Gensollen, 2004), face à laquelle la question des « enclosures » nécessaires au maintien de rentes est de plus en plus problématique (Moulier Boutang, 2007). Au final, travail, valeur et capital ne seraient alors plus mesurables par un étalon commun, ce qui n'est pas sans effet sur les modes d'organisation classiques et sur leur légitimité (Gorz, 2003).

L'ensemble de ces facteurs pousse certains auteurs à envisager la disparition du marketing par l'extension des tendances présentes dans le web 2.0, l'auto-promotion musicale, le téléchargement ou la consommation équitable. A l'inverse émergeraient des problématiques de design sur les conditions de la contribution (envisagées en marketing comme motivations à participer), de la construction de la réputation et de la rémunération dans ces environnements (à l'œuvre dans les politiques de marketing viral), des effets de l'*empowerment* (en débat en marketing en termes d'arbitrage entre contrôle et appropriation par les consommateurs), et *in fine* des professionnalisations induites (point absent des réflexions marketing).

Si la réalité de ces phénomènes est indéniable, la reconnaissance de leur extension à venir varie. Stiegler (2008) insiste ainsi sur le statut d'idéal type au sens weberien qu'il confère à la contribution. Moulier Boutang (2007) y décèle quant à lui les fondements de la troisième grande transformation du capitalisme, maintenant cognitif. Sennett (2008) confère à ces évolutions la force d'un modèle culturel à l'œuvre dont le caractère reste minoritaire. Pour d'autres enfin, elles ne sont qu'une des expressions du néocapitalisme financier, réduisant d'autant la portée de ces mutations.

Quelle place accorder au marketing dans cette économie naissante ? Peut-on admettre sa disparition sous l'effet de nouvelles relations entre producteurs et consommateurs alors que parallèlement le domaine de la consommation ne cesse de s'étendre ? N'assiste pas plutôt à l'émergence d'un n-ième nouveau paradigme correspondant à ces nouvelles formes d'organisation et de valorisation ?

3. Faire dialoguer la sociologie et le marketing pour comprendre l'auto-promotion des consommateurs producteurs

A partir de ces développements, la question semble non la disparition du marketing mais la forme et la place qu'il peut prendre à l'âge de la contribution. En effet, il existe une tension forte entre une vision des consommateurs comme mis au travail (Dujarier, 2008) ou comme amateurs-producteurs dotés d'un puissant désir de sublimation (Stiegler, 2008). Pour trancher, nous tenterons d'analyser la délégation aux consommateurs de la responsabilité des services qu'ils consomment et de l'entretien du marché où ils se situent, en nous interrogeant sur les pratiques d'auto-promotion et les relations dans une société de consommateurs.

Pour ce faire, nous nous appuyons sur deux études préalables de la construction sociale des compétences nécessaires à cette délégation sur les téléchargeurs et sur les joueurs-producteurs en ligne, menés dans le cadre d'un financement par la Région Lorraine et ayant donné lieu à différentes publications. Dans les deux cas, il s'agissait de comprendre le vécu des consommateurs, leurs pratiques, leurs apprentissages à travers des processus assimilables aux « carrières » décrites en sociologie du travail (Becker, 1985) et l'insertion des objets considérés dans leur vie quotidienne par une approche compréhensive des itinéraires de consommation (Desjeux, 2006). Une observation participante (d'un an dans les boîtes de nuit virtuelles du jeu Second Life et de deux ans pour le téléchargement) ainsi que des entretiens semi-directifs (35 en deux vagues pour le téléchargement, 25 pour Second Life) auprès de répondants d'âge, de sexe, de profession et de niveau ou de type d'utilisation différents ont été réalisés. Le choix de ces deux terrains renvoie aux recherches qui en font une avant-garde de l'amateurisme et de la contribution (Stiegler, 2008).

Une carrière du téléchargeur peut être reconstruite, de la première expérience à la posture d'amateur averti puis de « professionnel » capable de gérer un flux entrant de données constant. Les compétences acquises prennent des formes diverses. Au départ techniques car liées aux outils du téléchargement, elles deviennent esthétiques, l'ouverture permettant de continuer à télécharger, puis organisationnelles individuelles (recherche d'information) ou collectives (division du travail). A ce stade, l'activité à temps plein induite est parfois nommée « travail » par les répondants, se traduisant pour certains par l'animation de soirées. Ces apprentissages sociaux passent par la construction ou le renforcement d'un réseau d'individus avec qui on va « faire tourner » les pratiques, les contenus et les comportements. Au final, se met en place un renversement partiel des modes de valorisation du produit. Les consommateurs assurent la distribution des contenus, la production des supports finaux et l'information définissant les bons produits. Mais cette appropriation n'est pas sans problème, la relation au téléchargement perdant parfois son sens entre dépendance et boulimie.

De la même manière, la « carrière » des joueurs en ligne suppose une construction sociale de la satisfaction face au jeu et de l'expérience ressentie. Sur Second Life, le fait de jouer en ligne avec régulièrement plus de 35 000 joueurs et potentiellement plus de dix millions d'inscrits renforce le caractère social de cet apprentissage. De plus, la conception des profils et du jeu incite à une différenciation des tâches entre joueurs produisant, distribuant ou consommant les biens et services disponibles, par exemple dans les boîtes de nuit virtuelles. Les compétences nécessaires vont là encore être multiples et dépendre du rôle joué. Dans le cas du *clubbing*, elles sont en effet techniques (musique et informatique), mais aussi relationnelles (idiomes, présentation de soi et réseautage), ou marketing (animation, valorisation et communication autour des soirées). Différents métiers vont donc participer au lissage entre offre et demande et construire ce que danser dans ces boîtes veut dire. Ainsi, afin de faciliter l'interaction entre consommateurs, certains sont engagés comme « hôtes d'accueil » et rémunérés pour cette fonction par d'autres joueurs. Leur rôle va être à la fois d'expliquer les règles de bonne conduite, de vérifier que personne ne reste isolé, d'indiquer les principales fonctions du club, mais aussi d'animer et de pacifier les soirées. D'autres assument les tâches d'organisation des emplois du temps du staff et des Djs, ainsi que la maintenance des moyens de diffusion. Enfin, d'autres assument les tâches de communication sous la forme de revues en ligne, de listes de diffusion, d'annonces, voire d'organisation d'événements mêlant « vie réelle » et Second Life. Les rôles occupés varient dans le temps, fournissant des amitiés ou des opportunités, faisant de ce fait continuer à jouer. L'éditeur du jeu, Linden Lab, fournit donc un environnement que les joueurs s'approprient et animent. Cette prise en charge de la relation de service fait l'objet de différentes rémunérations : une meilleure jouabilité, une plus grande réputation, un rôle valorisant, ou une rémunération dans la monnaie propre au jeu, convertible en dollars. Restent à clarifier juridiquement la valeur des objets créés dans ces univers, l'identité de leurs propriétaires, ou leur possible taxation.

Face à ces observations, il semble difficile de parler de disparition du marketing lorsque les consommateurs contribuent aux biens et aux services qu'ils utilisent. Entre retranscription de leurs compétences et de leurs représentations du marketing dans la « vie réelle » et apprentissages spécifiques, on assiste plutôt à une hybridation des rôles et des pratiques. Celle-ci nous semble symptomatique de la continuation de l'extension de la société de consommateurs et du marketing comme fondement social. Cependant, celui-ci se retrouve confronté aux mêmes brouillages que de nombreuses autres professions et pourrait se dissoudre au moins partiellement dans le travail des consommateurs. La question devient alors celle de l'*empowerment* réellement souhaité par le marketing au-delà des injonctions paradoxales au « client-roi » (Dujarier, 2008), la plus difficile étant sûrement la perte de contrôle potentielle sur les consommateurs induite par la liberté de créer nécessaire à la contribution. Une fois ces questions posées, ce sont les conceptions de la résistance des consommateurs qui nous semble remises en cause.

Puisque la déviance est la base de toute innovation, plus qu'une résistance, certains des comportements des consommateurs expriment et anticipent sans doute un renouvellement schumpéterien des marchés.

Conclusion

Au travers de cette étude apparaît l'importance du dialogue entre marketing, sociologie de la consommation et sociologie du travail pour comprendre ce que l'économie de la contribution peut engendrer. Ceci est d'autant plus important qu'il a été rendu difficile par les oppositions en termes d'objet étudié et de positionnement épistémologique, voire par la mise en concurrence entre disciplines. Cependant, il serait illusoire de penser que sans explicitation en termes de recherche, cette hybridation n'a pas lieu. L'anthropologie de la consommation nous a appris de longue date que les marchés se saisissent du social tout en étant modelés par lui et qu'une part importante du marketing revient à la récupération de ses critiques.

Bibliographie

- Becker H.S., *Outsiders*, Paris, Editions Métailié, 1985.
- Cochoy F., *Une histoire du marketing*, Paris, Editions La Découverte, 1999.
- Cova B., Badot O., Bucci A., « *Au-delà du Marketing, le Societing* », Available from <http://visionary.wordpress.com/2006/07/12/au-dela-du-marketing-le-societing-par-cova-badot-et-bucci/>, 2006.
- Desjeux D., *La consommation, discipliner l'économie de marché*, Paris, PUF Que sais-je ?, 2006.
- Dujarier M.A., *Le travail du consommateur, de McDo à eBay: comment nous coproduisons ce que nous achetons*, Paris, Editions La Découverte, 2008.
- Filser M., *Le comportement du consommateur*, Paris, Dalloz, 1994.
- Gensollen M., « Economie non rivale et communautés d'informations », *Réseaux*, n°24, 2004, p. 141-206.
- Gorz A., *L'immatériel, connaissance, valeur et capital*, Paris, Editions Galilée, 2003.
- Grönroos C., "Value-driven relational marketing: from products to resources and competencies", *Journal of Marketing Management*, Vol. 13, 1997, p. 407-419.
- Himanen P., *The Hacker Ethic*, New York, Random House, 2001.
- Kotler P., Dubois B., *Marketing Management*, Paris, Publi Union, 1997.

Leadbeater C., Miller P., *The Pro-Am Revolution*, Demos. Available from <http://www.demos.co.uk/publications/proameconomy/>, 2004.

Moulier Boutang Y., *Le capitalisme cognitif, la nouvelle grande transformation*, Paris, Editions Amsterdam, 2007.

Sennett R., *La culture du nouveau capitalisme*, Paris, Hachette littératures, 2006.

Stiegler B. (Eds.), *Le design de nos existences à l'époque de l'innovation ascendante*, Paris, Fayard collection Mille et une nuits, 2008.

Strauss W., Howe N., *Generations, The history of America's future, 1584 to 2069*, New-York, Harper Perennial, 1991.

Tapscott D., Williams A. D., *Wikinomics: How Mass Collaboration Changes Everything*, New York, Portofoglio, 2007.

Von Hippel E., *Democratizing Innovation*, Harvard, The MIT Press, 2005.

La dénomination des commerciaux : une identité à revisiter ?

Anne Parizot

*IUT Reims-Châlons-Charleville- Université Champagne Ardenne
Département Techniques de commercialisation Orientation Génie de la
distribution industrielle*

*4 bd Jean Delautre
08000 Charleville Mézières*

Section : 71 ème

Secteur : tertiaire

anne.parizot@univ-reims.fr

Laboratoire Sorbonne : EA 1483 Recherches en français contemporain
Chargée de mission Recherche Association AECIUT (Association des
Enseignants de Communication en IUT)

Introduction

Nommer, désigner est un acte fondamental car il permet à toute chose, tout être d'avoir une réalité, et donc tout simplement d'exister. Il en est de même pour les métiers

Un certain nombre de mutations ou d'évolutions apparaissent : nouveaux métiers, nouvelles dénominations, ou encore modifications des dénominations avec ou sans modifications des contenus (compétences, savoirs...). Les entreprises revisitent la notion de «-commercial » et sont parfois amenées à créer une terminologie qui correspondent mieux aux postes et fonctions qu'elles proposent. La dénomination des commerciaux dans une approche socio-terminologique permet d'étudier les concepts ainsi que la relation qui les unit ou les distingue. C'est aussi une approche des métiers où se mêlent les notions de compétences, de savoir faire...qui permet de mieux les définir.

Les motivations qui ont déclenché cette recherche sont multiples.

Tout d'abord notre participation active à la création d'un département d'IUT TC GDI, actuellement au nombre de deux en France, dont l'objectif est de former des technico- commerciaux à double culture, technique et commerciale.

Ensuite en tant que Responsable de licence et enseignante PPP, nous nous sommes replongée dans les maquettes pédagogiques et référentiels puisque nous nous sommes confrontée à la notion de métiers pour en définir les débouchés (notamment au travers des modules PPP).

Enfin notre formation initiale de linguiste et terminologue nous a permis de mener à bien cette recherche

1. Le constat

Une multiplicité de dénominations ont été relevées dans les sources institutionnelles type AFNOR, APEC, Code ROME etc. et lors nos relations avec les entreprises (entretiens d'embauche, suivis de stage d'étudiants).

La terminologie est d'autant plus difficile à cerner que les concepts se ressemblent sans pour autant être identiques. Ils renvoient à des définitions proches mais dont certains critères diffèrent (on peut trouver pour une offre d'emploi identique deux dénominations, ou inversement une dénomination identique pour deux offres différentes).

De plus les entreprises, principaux acteurs de cette terminologie, créent leurs propres dénominations qui semblent être mieux adaptées à leur besoin.

L'objectif est donc de : faire un relevé des concepts employés auprès de sources variées, de confronter les définitions qui les caractérisent ainsi que les critères pris en compte (par exemple, le statut du salarié, la formation, les compétences, la taille ou le secteur de l'entreprise, le niveau de responsabilité). Ensuite il faut comprendre ce qui motive la formation des termes eux-mêmes ; comprendre la motivation des choix de ces termes par rapport aux autres pour désigner tel commercial.

2. Méthodologie

L'analyse linguistique et terminologique nous a permis de distinguer des axes distincts mais complémentaires s'appuyant d'une part sur une analyse de la langue et d'autre part sur l'analyse des termes dans le discours.

L'axe morpho syntaxique analyse comment les termes sont constitués, les axes sémantique et terminologique s'intéressent au sens des mots et des concepts en les situant dans des contextes, en étudiant leur évolution les uns par rapport aux autres ou par rapport à une norme.

L'axe sociologique vise à définir les compétences et aptitudes évoquées par les termes. Il donne une image de la représentation de ceux-ci dans la société.

3. L'analyse des sources

Parmi les sources répertoriées, l'exemple d'analyse réalisée par l'AFNOR est intéressant à plus d'un titre. Il s'agit d'une cartographie de la norme expérimentale sur l'excellence commerciale.

Les termes de la fonction commerciale sont répertoriés et se positionnent sur deux axes : métier/ fonction et soutien/vente. On retrouve par exemple le terme de technico-commercial (substantif) mais aussi ingénieur technico-commercial (nom et adjectif), ainsi que ceux de vendeur ou représentant. Le terme de commercialisateur apparaît aussi (mais propre à AFNOR). Le terme de commercial n'est cependant pas cité car l'AFNOR note que son utilisation pour désigner un emploi est à proscrire. Seul, c'est un emploi générique qui recouvre

l'ensemble des emplois.

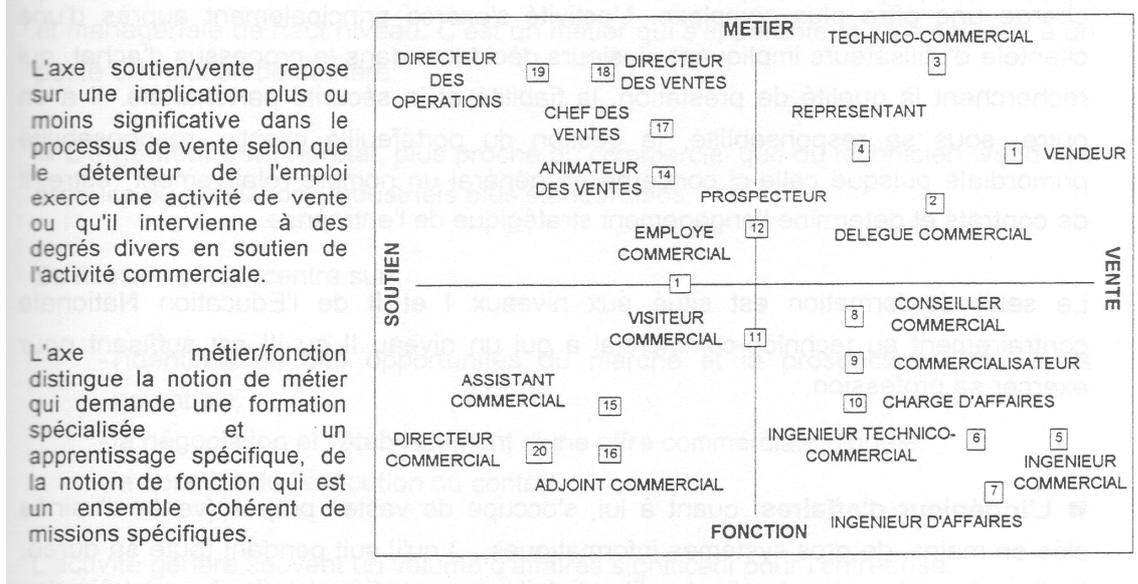


Figure 1 : Les emplois commerciaux.

Source : AFNOR Norme expérimentale, *Excellence commerciale, Emplois commerciaux, Méthode et identification*, imprimée en novembre 2002, p.7.

La définition proposée de « technico commercial » (TC) est la suivante : est chargé de vendre des produits, des services et savoir faire d'une entreprise auprès d'une clientèle existante ou potentielle. Mais la définition du terme « vendeur » est également : est chargé de vendre des produits services et savoir faire. Les deux définitions coïncident alors comment les différencier? C'est là qu'apparaissent des critères particuliers reposant sur les compétences, le contexte professionnel ou le statut. En effet un TC est issu d'une formation de niveau II ou III, le vendeur sort d'une formation de niveau III, IV ou V, les compétences doivent être différentes.

Il est en relation avec une clientèle institutionnelle, le vendeur avec une clientèle d'utilisateurs ou de consommateurs. Enfin le TC confirmé sera cadre alors que le vendeur ne pourra que très rarement accéder à ce statut.

Ces remarques posent le problème de la définition proprement dite : que doit-elle intégrer?

Nous avons constitué comme point de départ un tableau pour rassembler les dénominations relevées auprès des sources différentes, ainsi que les sigles qui correspondent à ces appellations. Ici ne figurent que quelques exemples.

Termes	Sigles	Source ADMI	Source AFNOR	Source ANPE ROME	Source APEC	Source INSEE PCS	Source DUT /BTS	Source Bac +3	Source Bac+ 4 et 5	Source Terrain
Account Manager					X					
Agent Technico- commercial	ATC			X						X
Attaché Commercial	AC			X						X

Figure 2 : Tableau synthétique des dénominations (extrait).

Le tableau dans son ensemble permet de voir que le terme de TC est le plus utilisé quelles que soient les sources les formations universitaires ou .même encore les entreprises. Certains emplois sont plutôt marginaux (représentant, etc.)

Mais nous avons pu également remarquer des disparités puisque un même terme peut être considéré comme générique c'est-à-dire représentant une classe pour une source alors que pour une autre il sera au contraire une sous catégorie.

Il semble donc bien difficile de dresser une typologie précise, chaque source semblant avoir ces propres critères de reconnaissance, de classification

4. L'enquête « terrain »

Nous avons donc cherché à aller un peu plus loin en proposant une enquête privilégiant le terrain, c'est-à-dire une enquête auprès des entreprises, acteurs essentiels dans l'utilisation et la création de cette terminologie des commerciaux.

Très intéressées, de nombreuses entreprises ont répondu à notre appel (Michelin, GIFEC (groupement des industriels fabricants pour l'étude de la commercialisation), CGI (confédération générale du commerce de gros).

Dans un premier temps l'enquête s'adresse aux DRH et aux responsables commerciaux. Elle devrait être complétée par une enquête auprès des commerciaux eux-mêmes.

L'objectif est de repérer précisément entreprise par entreprise les désignations employées, puis de les mettre en relation avec trois éléments :

- Le profil de poste,
- Les critères de choix du terme (plus ou moins valorisant...)
- L'évolution du terme (est-il récent, va-t-on en changer, quel était le terme avant.)

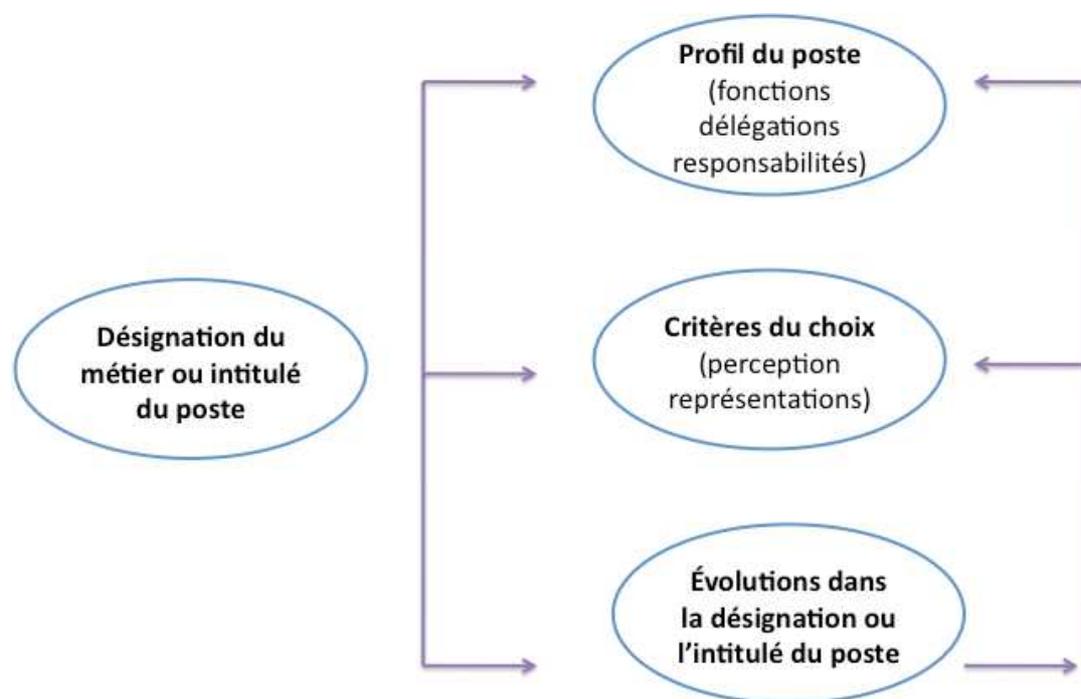


Figure 3 : Méthodologie de l'enquête.

4.1 *Une étude de cas : l'entreprise Michelin*

Pour être encore plus explicite dans notre analyse nous partirons d'une étude de cas construite à partir de remarques des DRH de l'entreprise Michelin.

Un des postes chez Michelin était RTC soit Responsable Technico-commercial. Pourtant ce terme a été remplacé par RCS Responsable Comptes Secteurs. On peut donc s'interroger sur les facteurs qui ont poussé l'entreprise à remplacer le terme initial.

L'entreprise a connu une période de réorganisation en supprimant des agences régionales. Par ce fait, Le RTC acquiert plus d'autonomie et la relation établie avec le client n'est plus la même. Une relation de partenariat est mise en place et l'offre se modifie. En effet avant le client achetait des pneumatiques. Maintenant on lui propose d'acheter des kilomètres. On proposait un produit : des pneumatiques, on lui propose désormais un **service**. **L'axe de la négociation en est profondément modifié**. Il impose un véritable partenariat : un diagnostic, un bilan, la construction d'une **proposition spécifique** à chaque client...



- le client achète des kilomètres et non plus des pneumatiques

- le rôle et l'action du commercial se modifie profondément :
après diagnostic, il aide son client à diminuer ses coûts...

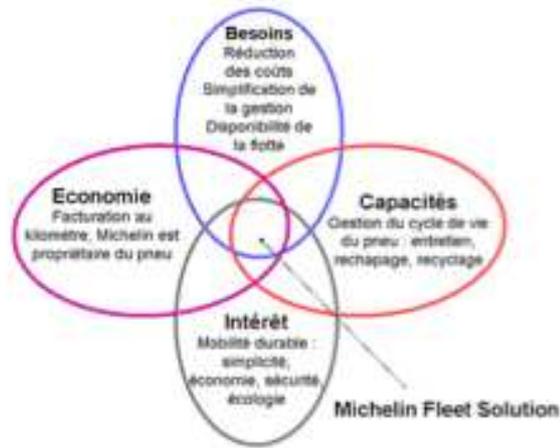


Figure 4 : Offre de l'entreprise et rôle du commercial.

En analysant les concepts de RTC et RCS, on note que : **le Responsable Technico-commercial** évoque **l'univers du produit**, le **Responsable Compte Secteur** place le collaborateur dans la dimension de la gestion d'un ensemble de clients, de comptes clients du secteur qu'on lui confie...Il ne s'agit plus simplement de vendre des produits mais de gérer **l'ensemble de la relation client** d'un secteur : chaque client devient un partenaire avec qui on construit une relation « durable ». Cette relation client est un ensemble complexe car elle intègre l'aide à la gestion des stocks, l'aide à la relation client (puisque le client

distributeur a lui-même ses clients), l'aide à la gestion du point de vente, et l'analyse de l'offre Michelin par rapport au point de vente.

On comprend mieux dès lors ce changement de dénomination dû à une évolution du poste, à partir d'une réorganisation de l'entreprise.

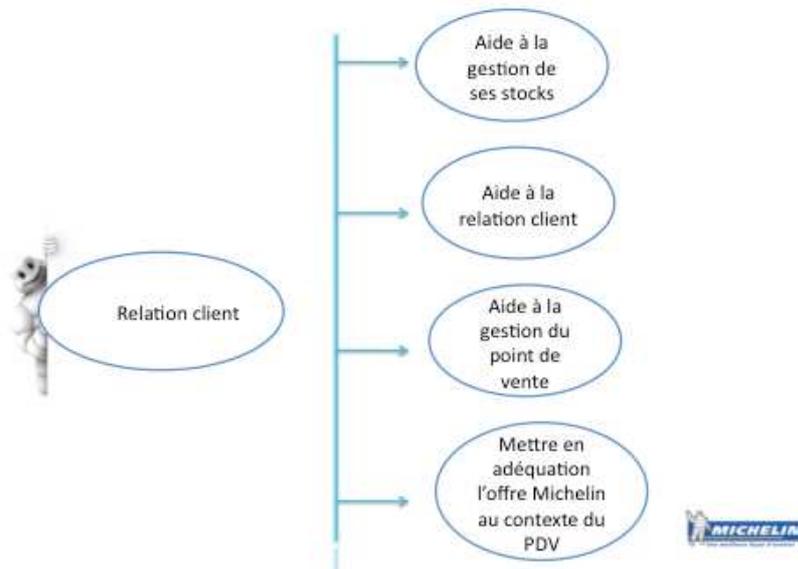


Figure 5 : La nouvelle relation client.

Le sigle « KAM » (Key Account Manager) correspond au Responsable Compte Clé. Il est utilisé car l'entreprise a des filiales internationales et il convient de créer une unité linguistique.

Responsable Compte Secteur et Responsable Compte Clé présentent une racine commune : « Responsable Compte ». On conserve la notion de client (compte), fondamentale. La distinction tient dans l'importance en terme de volume d'affaires de ou des clients du KAM et de son périmètre d'action (national). Sémantiquement, ces éléments correspondent aux appellations « junior et sénior » mais ces dernières renvoient directement à

l'expérience du commercial. L'usage de l'anglais permet de plus de créer une uniformité au sein des filiales internationales.

Ces quelques remarques révèlent la difficulté à définir des métiers car les critères qui les conditionnent sont multiples et relèvent aussi de la culture d'entreprise.

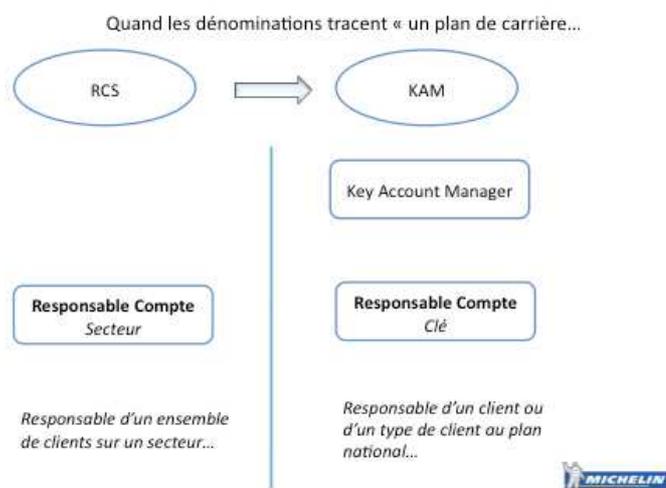


Figure 6 : Du Responsable Compte secteur au Responsable Compte Clé.

Conclusion

Cette recherche coïncide avec la mission des IUT : travailler en collaboration avec des entreprises. Elle permet aussi d'apporter des réponses aux étudiants sur le choix de débouchés et métiers possibles et de donner des exemples concrets pouvant être exploités dans le cadre des PPP.

De plus, elle sera un élément de réflexion pour les entreprises ayant besoin de créer ou de faire évoluer la dénomination de leurs commerciaux, l'évolution des concepts étant liée à l'évolution de la société.

Enfin, elle constitue un exemple de réflexion et de recherche dans le domaine des sciences dites « molles », dans lequel de nombreuses interrogations quant à ces activités voient le jour.

Vers une nouvelle appréhension du comportement du consommateur face à un nouveau produit : Une approche exploratoire qualitative

Achraf SELLAMI

*IUT de Saint-Nazaire (ATER)
Département Techniques de Commercialisation
58, rue Michel Ange BP 420, 44606 Saint Nazaire Cedex*

*Université Paris 1 - Sorbonne (Doctorant) – PRISM (EA 4101)
17 Rue de la Sorbonne - 75231 Paris Cedex 05.*

achraf.sellami(at)malix.univ-paris1.fr

Sections de rattachement : 06

Secteur : Tertiaire

RESUME : *Le positionnement de cette recherche est la résultante d'une absence de consensus dans les recherches antérieures concernant les facteurs individuels ainsi que les facteurs situationnels non appréhendés dans l'explication des réactions du consommateur face à un nouveau produit. Afin d'étudier l'impact conjoint de ces facteurs, un essai de modélisation est développé sur la base d'une revue de la littérature ainsi que d'une étude exploratoire qualitative dont les contributions seront discutées, tant sur le plan théorique que managérial. Des voies de recherches futures seront présentées.*

MOTS-CLÉS : *nouveaux produits, facteurs situationnels, innovativité, besoin de cognition, besoin d'unicité, comportement d'achat*

1. Introduction : Contexte managérial et théorique de la recherche

Le succès ou l'échec d'un nouveau produit est la question qui va animer nos motivations à travers cette recherche et qui résulte des constats suivants : 30 000 nouveaux produits sont lancés chaque année dont nombre d'entre eux ne fournissent pas de revenu incrémental, ni aux distributeurs, vu le coût non négligeable de référencement et déréférencement, ni aux producteurs vu les investissements considérables engagés.

Il est à souligner que plusieurs nouveaux produits sont retirés du marché lors des trois premières années de lancement et le taux de survie est estimé entre 20 et 30%. (AC Nielsen, 2006)

Dans ce sens, l'augmentation remarquable du nombre d'innovations, d'une part, ainsi que l'allure exponentielle du taux d'échec des nouveaux produits (20 à 95%) lancés sur le marché (Cabinet Novaction, Source: Le Nagard-Assayag et Manceau, 2005) d'autre part, ont attiré l'attention de plusieurs chercheurs en marketing afin de décrypter les variables inhérentes aux comportements des consommateurs face à ces nouveaux produits. Ces consommateurs, confrontés en permanence à des arbitrages draconiens pour leur bien être et leur portefeuille, ne demandent qu'à être « séduits » par des produits et des services nouveaux. Ainsi, une adaptation de l'offre passant forcément par une meilleure compréhension du processus d'acceptation des nouveaux produits par les consommateurs paraît essentielle afin de mettre à jour les tenants et les aboutissants de l'innovation et améliorer la performance des entreprises dans le domaine. Cette adaptation de l'offre constitue un véritable facteur clé de succès, de croissance et de compétitivité pour chaque entreprise.

Par conséquent, sur un plan théorique et académique, le *Marketing Science Institut* (MSI *Research Priorities*, 2008-2010)² classe la thématique des recherches sur les innovations comme prioritaire et comme sujet d'actualité jusqu'à nos jours. En France, les numéros spéciaux de la revue managériale *Décision Marketing* coordonnés par Le Nagard (2007) sous le thème « le miracle de l'innovation » et de la revue *Recherche et Applications en Marketing* coordonnés par Desmet et Jolibert (2005) sur le thème de « stratégie-produits », viennent souligner la contribution significative tant sur le plan méthodologique que conceptuel des recherches sur les nouveaux produits.

Pendant, plusieurs approches ont essayé d'étudier le comportement du consommateur face aux nouveaux produits (Midgley et Dowling, 1978 ; Rogers, 1962-2003; Goldsmith et Hofacker, 1991; Roehrich, 1993-2004). Les résultats de ces recherches, abordées tantôt dans une optique de complémentarité ou d'une manière disjointe, limitées à des comparaisons et à l'investigation de relations isolées, ont capitalisé une absence de consensus concernant **les variables individuelles** expliquant le processus d'adoption d'un nouveau produit (Roehrich, 2004 ; Hauser et al, 2006 ; Burns, 2007).

Dans la même perspective des recherches déjà menées, la littérature sur le **paradigme situationnel** basé sur les travaux de Belk (1975) associée aux travaux sur le comportement d'achat des nouveaux produits se présente comme un terrain non encore exploré dans la recherche en marketing (Lai, 1991 ; Roehrich, 2001).

La **problématique** de cette recherche va donc adhérer à l'étude des tensions suivantes, à savoir :

² . www.msi.org rubrique Current Research Priorities; http://www.msi.org/pdf/MSI_RP08-10.pdf ; accès le 13 mars 2009.

- la non-prise en compte des facteurs situationnels et de l'affect du consommateur (les émotions) dans son processus d'adoption d'un nouveau produit (Hoffmann, 2007).

- l'effet inéluctable des caractéristiques perçues d'un nouveau produit qui va orienter le comportement du consommateur (Rogers, 2003).

- le faible pouvoir explicatif de l'innovativité (variable prisée par les chercheurs dans le domaine) pour la décision d'achat d'un nouveau produit (Roehrich, 2004) : d'autres variables individuelles peuvent concourir à une meilleure explication du comportement (Burns, 2007).

- la considération du seul acte d'achat comme indicatif d'adoption du nouveau produit reste une approche limitée, étant donné que le processus d'adoption va au-delà du simple acte d'achat avec un degré d'usage qui dépend du contexte dans lequel il sera utilisé (Filsler, 1994 ; Shih et Venkatesh, 2004; Hoffmann et al, 2006, Hoffmann, 2007).

Ces constats nous amènent à poser la **question de recherche** suivante: *Dans quelle mesure les variables individuelles et situationnelles influencent-elles les réactions cognitives, affectives et conatives du consommateur face à un nouveau produit ?*

Les **objectifs** qui découlent de cette question de recherche se proposent d'étudier :

- les caractéristiques perçues du nouveau produit les plus pertinentes conditionnant le choix du consommateur.

- l'impact de certaines variables individuelles qui n'ont pas fait l'objet d'investigation dans la littérature et qui semblent avoir une meilleure prédiction du comportement du consommateur face à un nouveau produit.

- le rôle des facteurs situationnels sur les réactions du consommateur face à un nouveau produit.

L'**intérêt** de cette recherche pour le théoricien est de présenter un cadre conceptuel centré sur l'achat de nouveaux produits qui permettra de distinguer, sur les plans théoriques d'une part et empiriques d'autre part, les différents facteurs situationnels et individuels expliquant les réactions cognitives, affectives et comportementales du consommateur face à un nouveau produit et qui n'ont pas fait, jusqu'à ce jour, l'objet d'étude dans ce courant de recherche.

Cette recherche aura à interpellier le praticien (producteur et/ou distributeur) dans son processus d'anticipation et de prospection de plusieurs leviers stratégiques et opérationnels relatifs à son mix-marketing ; tout en proposant des directives et des recommandations nouvelles, adaptées aux consommateurs et à leurs nouveaux modes de consommations, touchant en amont, les stades de développement des nouveaux produits, et en aval leur distribution.

2. Le cadre d'analyse théorique de la recherche et les principaux concepts

Pour étudier l'effet des facteurs individuels et situationnels sur le comportement du consommateur face à un nouveau produit, cette recherche puise son fondement (**Figure 1**) sur le fait que le consommateur d'un nouveau produit peut être identifié à travers deux volets :

- Pour étudier le consommateur d'une innovation, il serait utile de l'appréhender à travers les recherches mobilisées sur la théorie de la diffusion des innovations de Rogers (1962-2003) qui reste la référence jusqu'à nos jours.

- Par ailleurs, dans la littérature, les chercheurs s'accordent sur le fait que la situation détermine fortement le comportement. Il serait alors judicieux, dans un deuxième volet, d'examiner le comportement de ce consommateur face à un nouveau produit dans le cadre des recherches sur les modèles issus de la psychologie environnementale et le paradigme behavioriste Stimulus-Organisme-Réponse (S.O.R) pour décrire l'effet de l'environnement (la situation) sur le comportement d'un individu (Belk, 1975).

Enfin, l'étude qualitative menée dans cette recherche se proposera de préparer le terrain de la recherche et déterminer les modalités des variables à étudier dans la partie empirique.

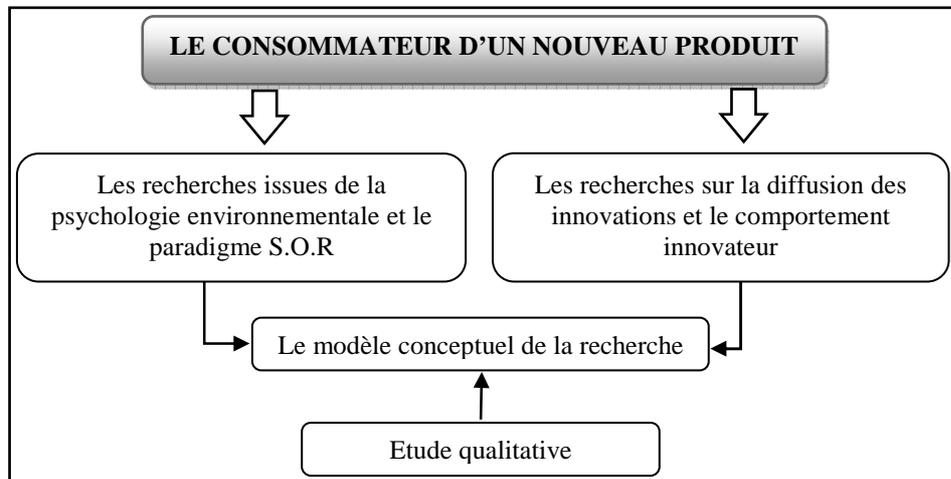


Figure 1 : Cadre conceptuel de la recherche.

2.1. Définition des caractéristiques d'un nouveau produit

Un nouveau produit c'est « *Toute marchandise, toute prestation de service ou toute idée perçue comme nouvelle par un individu et ayant un effet sur les modes de consommation établis* » (Rogers, 2003 ; Kotler et al, 2006).

La littérature fait ressortir plusieurs typologies de nouveaux produits (Kotler et al. 2006): **(1)** la typologie de Robertson (1971) pour *les innovations continues, les innovations continues dynamique ou semi-continues et les innovations discontinues*. Ainsi que la typologie de **(2)** Booz, Allen et Hamilton (1982) pour *les produits entièrement nouveaux, les nouvelles lignes de produits, les extensions de gamme, les améliorations de produits, les repositionnements et les nouveaux produits moins chers*.

Pour Rogers (2003), la première cause de l'intention d'achat d'un nouveau produit est la manière dont il est perçu par les acheteurs potentiels à travers les **caractéristiques perçues du nouveau produit** : *l'avantage relatif, la compatibilité, la complexité, la facilité d'essai et l'observabilité* auxquels Ostlund (1974) suggère d'ajouter *le risque perçu* et Roehrich (1985, 1987, 2001) *la nouveauté perçue*.

L'avantage relatif : c'est « *le degré selon lequel une innovation est perçue comme meilleure que l'idée qu'elle remplace* ». L'avantage relatif, positivement lié à la diffusion, peut prendre plusieurs formes : avantage économique (prix inférieur, meilleure utilisation du produit) et l'obtention d'un statut.

La compatibilité : c'est le degré selon lequel « *une innovation est cohérente avec les valeurs existantes, les expériences passées et les besoins des adoptants potentiels* ». Plus une innovation possède une grande compatibilité, moins elle crée d'incertitude. En effet, une innovation est évaluée en comparaison avec les innovations déjà adoptées dans la même catégorie de produit et son échec peut entraîner une forte résistance aux innovations futures de la catégorie de produit en question.

La complexité : c'est « *le degré selon lequel une innovation est perçue comme étant relativement difficile à comprendre et à utiliser* ». Rogers (1962-2003) stipule que la complexité est négativement corrélée à l'adoption d'une innovation : une innovation est d'autant plus complexe que sa diffusion sera lente.

La facilité d'essai : c'est la possibilité de pouvoir utiliser le produit et de se familiariser ainsi avec l'innovation (échantillon ou produit à petit format). La vitesse d'adoption et de diffusion d'une innovation est d'autant plus rapide qu'elle est facilement accessible à l'essai.

L'observabilité : c'est « *le degré selon lequel les résultats d'une innovation sont visibles par d'autres* ». La visibilité de l'innovation joue un rôle important

dans la procuration d'un statut à l'individu qui l'adopte. Par ailleurs, si l'entourage de ce dernier identifie facilement les résultats et l'avantage relatif de cette innovation, il sera enclin à l'adopter. Une innovation est d'autant plus visible qu'elle est plus vite diffusée.

A l'instar des travaux de Rogers (1962-2003), Ostlund (1974) ajoute une sixième caractéristique et affirme que l'acceptation de l'innovation dépend de l'influence du risque perçu de l'innovation par l'individu. Le risque perçu représente les conséquences négatives, d'ordre financier ou psychologique, auxquelles est soumis un consommateur en cas d'erreur lors de son choix.

Enfin, Roehrich (1985, 1987, 1993, 2001) intègre la nouveauté perçue en illustrant le rôle important qu'elle peut jouer dans le processus d'adoption des nouveaux produits. L'auteur recommande d'inclure la nouveauté perçue et de mesurer son niveau dans toute étude relative au comportement d'achat des nouveaux produits : elle est indépendante des autres caractéristiques perçues de l'innovation et négativement corrélée à l'intention d'achat.

Selon Rogers (2003), ces caractéristiques perçues expliquent 49% de la variance de la vitesse de diffusion tout en tenant compte de la différence du poids de chaque caractéristique dans l'explication de cette diffusion. Ces caractéristiques perçues présentent alors un intérêt du fait qu'elles peuvent servir de base d'anticipation, en amont, de l'intention d'achat d'un nouveau produit ainsi que de leur capacité à expliquer, en aval, le taux d'adoption d'une innovation (Hoffmann, 2007).

2.2. Les fondements de la littérature : Définition des principales approches

La littérature a été marquée par deux approches présentant deux courants majeurs de pensée définissant l'aspect du comportement d'achat des nouveaux produits par le consommateur ainsi que leur diffusion à travers toute une population d'individus :

- l'approche empirique de Rogers (1962-2003), fondateur de la théorie de la diffusion des innovations et qui, par son approche comportementale, fait référence aux innovateurs : « *Individus qui adoptent réellement les innovations* ».
- l'approche psychologique de Midgley et Dowling (1978) mettant en avant la dimension de l'innovativité qui fait référence aux innovatifs (Touzani, 1999) : « *Individus réceptifs et favorables à l'égard des innovations* ».

Cette littérature a été synthétisée dans les travaux de Roehrich (1987-2004) en France, par l'intégration des deux approches. Les principaux enseignements de cette synthèse montrent que le comportement innovateur n'est pas seulement expliqué par l'innovativité innée ou l'innovativité spécifique à une catégorie de produit donné (Midgley et Dowling, 1978; Rogers, 2003; Goldsmith et Hofacker, 1991; Roehrich, 2004) mais plutôt par une panoplie de variables, choisies d'une

manière subjective, ayant marqué le débat de la tendance et de la propension du consommateur à innover.

Plusieurs chercheurs ont pointé les limites inhérentes aux paradigmes soulevés ci-dessus tout en mettant en avant le processus d'**usage de l'innovation** qui mérite d'être pris en considération (Shih et Venkatesh, 2004). Cependant, dans la lignée des travaux de Gatignon et Robertson (1985) où « *le degré d'usage d'une innovation est une variable pertinente qui décrit l'étendue de la diffusion de cette innovation* », Shih et Venkatesh (2004) proposent, à travers ces déterminants (antécédents) et les conséquences qui en résultent, une conceptualisation de l'usage des innovations qu'ils ont appliquée dans le domaine d'adoption des innovations de technologies domestiques.

Par opposition au modèle de Rogers (2003), basé principalement sur *le temps d'adoption d'une innovation par les membres d'un système social*, l'approche de Shih et Venkatesh (2004) se base sur la nature de l'usage en termes de *taux d'usage* (temps d'usage) et de *variété d'usage* (différentes situations et manières d'usage). Les mêmes auteurs montrent, par ailleurs, que l'adoption d'une innovation technologique possède quatre antécédents : le *contexte social du foyer*, la *dimension technologique*, la *dimension personnelle* et la *dimension externe*, et identifient quatre schémas potentiels de diffusion de l'usage, à savoir : l'*usage intense*, l'*usage spécialisé*, l'*usage limité* et l'*usage non spécialisé*. Cependant, par analogie aux travaux de Rogers (1962-2003), ces quatre schémas peuvent être assimilés aux cinq catégories d'adopteur (innovateurs, adopteurs précoces, majorité précoce, majorité tardive et les retardataires).

2.3. *L'impact conjoint des caractéristiques individuelles et de la situation*

Cette recherche se propose, à partir des différents concepts croisés dans la littérature, d'adapter, dans un premier temps, les variables individuelles qui seront mises en jeu et qui, à notre connaissance, n'ont pas fait l'objet d'étude approfondie sur le comportement d'achat des nouveaux produits.

Dans un deuxième point, sera présentée l'approche de Belk (1975) sur les situations et les contextes de consommation conditionnant le comportement d'un individu ainsi que l'intérêt de son application sur l'achat des nouveaux produits.

2.3.1 *Les variables individuelles*

- **L'intérêt à la catégorie du produit** représente l'expression de la force de relation qui existe entre la catégorie du produit nouveau et l'individu, elle est définie par « *la tendance durable à rechercher de l'information et/ou à effectuer des achats au sein d'une catégorie spécifique de produits* » (Laurent et Kapferer, 1985).

- **La besoin d'unicité** qui est le désir d'être différent et unique engendrant des choix non conventionnels chez des individus l'exprimant d'une manière assez prononcée (Snyder et Fromkin, 1980; Tepper et Hoyle, 1996). Ses origines, d'ordre social (Burns, 1989) et culturel (Kim et Dorlet, 2003), dépendant de l'environnement externe à l'individu, vont guider les activités du consommateur tout en reflétant l'image de ce dernier à travers la nature du nouveau produit possédé et qui est unique (Tian et al, 2001; Redmond, 2004). Cette recherche d'unicité peut se manifester, par exemple, dans le choix d'un point de vente, d'une communauté ou d'un groupe d'appartenance. (Burns et Warren, 1995)

- **Le besoin de cognition (NFC)** représente une variable qui centre le débat à travers les recherches sur le traitement cognitif de l'information. Elle représente la source d'« *un plaisir qui motive les individus à fort besoin de cognition à s'engager dans des activités nécessitant des efforts cognitifs* » (Petty et Cacioppo, 1980). Le besoin de cognition peut donc aider à l'explication de la propension des individus enclins à l'achat de nouveaux produits puisque l'attitude des consommateurs envers ces derniers est prédite par les individus à fort besoin de cognition plutôt que par ceux ayant un faible besoin de cognition (Wood et Swait, 2002).

2.3.2. Les facteurs situationnels

Ces facteurs ont été déjà abordés dans la littérature au niveau de leurs capacités prédictives des intentions d'achat. Ils représentent des facteurs peu appréhendés et dont les dimensions ont été partiellement exploitées dans les recherches en comportement du consommateur spécifique aux nouveaux produits (Lai, 1991 ; Roehrich, 2001). Ces facteurs situationnels trouvent leurs origines dans les travaux de la psychologie environnementale basée sur le paradigme (S.O.R) Stimulus-Organisme-Réponse pour décrire l'effet de la situation sur le comportement du consommateur (Belk, 1975).

Il existe deux expressions de la situation : la première est **subjective**, elle influence l'individu selon la perception qu'il en a. La seconde est **objective**, elle influence tous les individus de la même façon. Selon Belk (1975), toute situation correspond à une configuration particulière des cinq dimensions génériques qui fondent la popularité de ses recherches, à savoir : **(1) l'environnement physique, (2) l'environnement social, (3) la perspective temporelle, (4) la définition des rôles et (5) les états antérieurs.**

Selon Lemoine (1994), il est possible de distinguer trois types de situation présentant un intérêt direct pour les spécialistes en marketing, à savoir :

- **la situation de consommation** qui circonscrit les conditions d'utilisation anticipées pour le produit considéré (voyager en couple ou en famille, usage unique/multiple du produit).

- **la situation d'achat** décrit soit les conditions qui prévalent sur le lieu d'achat (disponibilité du produit, prix, promotions...), soit la nature même de l'achat effectué (achat pour soi ou pour offrir, être accompagné lors de l'achat...).
- **la situation de communication** définie par l'environnement de l'individu lorsqu'il est exposé à une communication de nature personnelle ou impersonnelle.

Il est à noter qu'il n'y a pas eu d'études spécifiquement destinées à évaluer l'influence des variables situationnelles sur l'achat de produits nouveaux (Lai, 1991 ; Roehrich, 2001); cependant, des résultats obtenus dans des situations générales ont montré que la situation détermine fortement le comportement (Lemoine, 1994), mais ces résultats sont difficilement comparables. En effet, chacune des études n'utilise que quelques éléments situationnels et ce sont rarement les mêmes d'une étude à une autre.

3. Analyse qualitative et genèse du modèle conceptuel de la recherche

Pour consolider l'analyse de la littérature qui vient d'être présentée, une étude qualitative a été privilégiée, dont l'objectif est d'identifier et de classer les éléments sous-jacents à la demande d'un nouveau produit et qui nécessitent d'être pris en compte pour la préparation de la phase empirique de terrain. L'intérêt demeure dans l'approfondissement des résultats dégagés de la littérature ainsi que l'ajustement des modalités des construits, permettant d'apporter des précisions aux implications théoriques et managériales qui peuvent être envisagées dans le cadre de la recherche.

Par rapport aux différents outils et techniques de recherche qualitative et contrairement aux entretiens de groupe dont le but est de stimuler l'imagination des individus, l'entretien semi directif individuel ainsi que les techniques projectives ont été privilégiés dans cette recherche. Guide d'entretien à l'appui pour mener les interviews, l'association de ces deux techniques aura pour but de projeter le répondant dans une situation donnée et à travers laquelle sera mis en avant son avis personnel sur des notions dont les définitions données par la revue de la littérature restent floues et multiples (Evrard et al. 2003).

Les thèmes abordés dans le guide d'entretien se sont focalisés sur l'interrogation du répondant à travers le récit de son dernier achat, de la signification d'un nouveau produit et qu'est ce qui les inciterait à l'adopter, et enfin sur ce qu'ils pensent des acheteurs de huit catégories de produits complètement hétérogènes dans leur nature ainsi que dans leur degré d'implication, considérés comme nouveaux lors de la période de l'étude : le nouveau Coca-cola vitamines et antioxydant, la nouvelle 308 de Peugeot, la nouvelle Wii, la nouvelle PS 3, le nouveau film *Bienvenue chez les Ch'tis*, le dernier volume d'Harry Potter, le nouvel iPhone, le service de paiement par téléphonie mobile et enfin le yaourt « essencis »³ de Danone.

³ L'entreprise Danone a retiré le yaourt « essencis » du marché le 1^{er} mars 2009 pour cause de ventes très faible et où la grande distribution était un circuit inapproprié pour un produit

Lors de cette phase qualitative, 17 entretiens de durée moyenne de 45 minutes ont été enregistrés et retranscrits afin de procéder à des lectures répétées et « flottantes » de l'ensemble du discours permettant une analyse manuelle de contenu (Bardin, 2007 ; Giannelloni et Vernet, 1995).

La composition de l'échantillon de convenance étudié dans cette recherche comprend 9 individus de sexe masculin et 8 individus de sexe féminin. Les individus ont été interrogés à leur domicile. L'âge des répondants est compris entre 18 et 54 ans avec une moyenne de 28 ans. Tous les répondants ont un niveau d'études allant du baccalauréat aux études doctorales. Il s'agit d'une population jeune, active et vivant en milieu urbain.

Les résultats qui émergent de l'analyse thématique du discours des répondants, basés sur le comptage des fréquences d'apparition des occurrences rattachées à nos variables, objet d'étude, se présentent comme suit :

De prime à bord, sauf comportement impulsif, le consommateur doit être intéressé par une catégorie de produit donnée afin d'exprimer une forte envie pour l'avoir et se lancer dans un processus de recherche d'informations pour orienter l'usage qu'il va en faire par rapport à une situation donnée : usage hédonique ou utilitaire par exemple. Ce consommateur découvre généralement le nouveau produit par hasard et à ce moment les caractéristiques perçues vont jouer le rôle d'un pivot moteur dans l'évaluation du nouveau produit.

Pour assouvir un besoin d'unicité, le consommateur cherchera à se procurer le dernier nouveau produit pour afficher un statut unique et non conventionnel par rapport à son entourage : « *Les gens qui l'ont acheté aiment bien la nouveauté et l'exclusivité* ».

Cependant dans d'autres circonstances et avec un minimum de risque, il va essayer de s'informer et de se forger ses propres connaissances à travers la procuration d'un nouveau produit : « *Je fais très peu attention à ce que disent les gens sur un nouveau film, j'aime bien me faire mon propre avis* ».

Les facteurs situationnels (environnementaux et sociaux) semblent avoir un double effet. Un effet direct qui peut court-circuiter l'attitude dans son processus cognitif et affectif lors de l'évaluation du nouveau produit. Un deuxième effet, indirect de la situation, médiatisé par les réactions cognitives et affectives, sur le comportement effectif du consommateur.

Concernant les émotions, c'est la dimension « plaisir » qui se dégage dans les verbatim des différents entretiens. Cependant cette dimension « plaisir » peut être tantôt le résultat d'une situation donnée (« *Toute seule, j'ai tendance à plus dépenser par ce qu'à ce moment là, je n'ai pas d'autre avis et je pense que cela me plaît, donc j'achète* ») et tantôt la résultante d'une confrontation avec le nouveau produit (« *En tous cas, ça fait vraiment plaisir, un double plaisir même,*

positionné « beauté ». (LSA n°2077 du 12/02/2009). Notre étude qualitative a été menée avant l'annonce et le retrait du produit en question.

tu joues à un sport que tu n'as jamais pu pratiquer et que tu ne pratiqueras pas peut être dans la réalité...) ou encore (« *Leur plaisir et leur vision de la vitamine se limite à un coca-cola !* »).

Le comportement final se manifeste soit à travers une intention d'achat ou d'adoption, un ajournement de l'achat ou une résistance totale au nouveau produit en question.

Les résultats de notre investigation théorique à partir de la littérature ainsi que des premières retombées issues de la recherche qualitative sont représentés dans le modèle conceptuel de la **figure 2** ci-dessous.

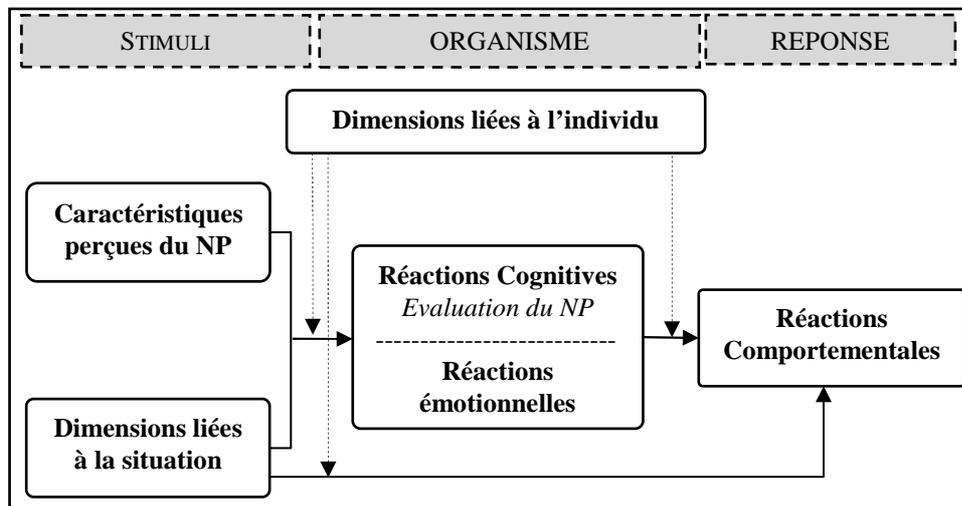


Figure 2 : Le modèle conceptuel de la recherche.

4. Conclusion

Cette recherche avait pour objet l'étude de l'impact des facteurs situationnels sur les réactions cognitives, affectives et comportementales du consommateur face à un nouveau produit. Pour ce faire, une approche par le paradigme S-O-R (Stimulus-Organisme-Réponse) modérée par des facteurs individuels a été privilégiée.

Un essai de modélisation a été proposé dans ce papier sur la base d'une révision de la littérature et d'une recherche qualitative exploratoire. L'opérationnalisation de l'étude qualitative a été faite moyennant des entretiens

semi-directifs basés sur un guide d'entretien structuré en partie à l'aide d'outils projectifs (17 individus interrogés).

L'étude qualitative avait pour principal objectif de montrer que les dimensions du modèle de la recherche (émanant principalement de la littérature) existent manifestement. Cependant, cette phase exploratoire comme son nom l'indique a tenté de justifier les choix mobilisés dans la recherche avec la principale limite de ne rien prouver.

Pour mieux cerner les retombées issues de cette recherche exploratoire qui reste limitée à toute généralisation, une approche empirique chiffrée apportera plus de lumière sur la portée de notre modèle. Ainsi, une étude confirmatoire quantitative, basée sur une expérimentation in-situ (dans un point de vente), sur un échantillon plus représentatif de la population française serait d'un grand intérêt. L'opérationnalisation des dimensions individuelles, situationnelles et des caractéristiques perçues se fera respectivement sur la base d'échelles de mesures empruntées à la littérature ainsi que d'un inventaire de scénarii de situations dégagé du matériel qualitatif.

La principale contribution serait d'étudier la stabilité du modèle conceptuel proposé et dont le principal apport demeure l'étude de l'impact conjoint des variables individuelles et situationnelles sur le comportement du consommateur face aux nouveaux produits.

Bibliographie

- Bardin L. (2007), *L'analyse de contenu*, Presses Universitaires de France, Puf, Quadrige Manuels, Paris.
- Belk R. (1975), Situational variables and consumer behavior, *Journal of Consumer Research*, 2, 157-164.
- Booz, Allen et Hamilton (1982), *New products management for the 1980s*, New York, Booz Allen et Hamilton Inc.
- Burns D. J. (1989), Current approaches to the study of higher level human needs, *Home Economics Forum*, 3, 9-10.
- Burns D. J. (2007), Toward an explanatory model of innovative behavior, *Journal of Business and Psychology*, 21, 4, 461-488.
- Burns D. J. et Warren H. B. (1995), Need for uniqueness: shopping mall preference and choice activity, *International Journal of Retail and Distribution Management*, 23, 4-12.

- Desmet P. et Jolibert A. (2005), Stratégies produit, *Recherche et Applications en Marketing*, Numéro Spécial, 20, 3.
- Evrard Y., Pras B. et Roux E. (2003), *Market, études et recherches en marketing*, 3^{ème} édition, Dunod.
- Filser M. (1994), *Le Comportement du consommateur*, Dalloz, Paris.
- Gatignon T. et Robertson T.S. (1985), A propositional inventory for new diffusion research, *Journal of Consumer Research*, 11, 4, 849-866.
- Giannelloni J.-L et Vernet E. (1995), *Etudes de Marchés*, Vuibert.
- Goldsmith R. et Hofacker, C. (1991), Measuring Consumer Innovativeness, *Journal of the Academy of Marketing Science*, 19, 209-221
- Hauser J., Tellis G. J. et Griffin, A., (2006), Research on Innovation: A Review and agenda for marketing science, *Marketing Science*, 25, 6, 687-717.
- Hoffman J., Roehrich G. et Mathieu J. P., (2006), Le rôle de l'anticipation d'usage et de l'intention d'usage dans l'évaluation d'un nouveau produit, *Actes du 22^{ème} congrès de l'AFM*, mai, Nantes.
- Hoffmann J. (2007), Développement et test d'un modèle des déterminants individuels de l'adoption des innovations technologiques dans l'industrie des TIC, *Thèse de Doctorat ès Sciences de Gestion*, Université Pierre-Mendes France de Grenoble.
- Kim H. S. et Drolet A. (2003), Choice and self-expression: a cultural analysis of variety seeking. *Journal of Personality and Social Psychology*, 85, 373-382.
- Kotler P., Keller K., Dubois B. et Manceau D. (2006), *Marketing management*, 12^{ème} édition, Pearson Education, France.
- Lai A.W. (1991), Consumption situation and product knowledge in the adoption of a new product, *European Journal of Marketing*, 25, 10, 55-67.
- Laurent G. et Kapferer J. N. (1985), Measuring involvement profiles, *Journal of Marketing Research*, 22, 1, 41-53.
- Le Nagard E. (2007), Le miracle de l'innovation, *Décisions Marketing*, 48, 5-6.
- Le Nagard-Assayag E., Manceau D. (2005), *Le marketing des nouveaux produits: de la création au lancement*, Dunod.
- Lemoine J. F. (1994), L'influence des facteurs situationnels sur le processus d'achat, *Thèse pour le Doctorat d'Etat ès Sciences de Gestion*, Université de Poitiers.
- Midgley D. F. et Dowling G. R. (1978), Innovativeness: the Concept and its Measurement, *Journal of Consumer Research*, 4, Mars, 229-242.
- Petty R. E. et Cacioppo J. T. (1980), Attitudes and: classic and contemporary approaches, Dubuque, I.A.: Wm. C. Brown, 20-24.
- Redmond W. H. (2004), Interconnectivity in diffusion of innovations and market competition, *Journal of Business Research*, 57, 1295-1302.

- Roehrich G. (1985), Innovation et nouveauté perçue, *Acte de la conférence annuelle de l'AFM*, 29-30 avril, 22-45.
- Roehrich G. (1987), Nouveauté perçue d'une innovation, *Recherche et Application en Marketing*, 2, 1,1-15.
- Roehrich G. (1993), Les consommateurs innovateurs: un essai d'identification, *Thèse pour le Doctorat d'Etat ès Sciences de Gestion*, Ecole Supérieure des Affaires de Grenoble.
- Roehrich G. (2001), Cause de l'achat d'un nouveau produit : variables individuelles ou caractéristiques perçues, *Revue Française de Marketing*, n°182, p83.
- Roehrich G. (2004), Consumer Innovativeness: Concept and Measurement, *Journal of Business Research*, 57, 671-677.
- Rogers E. M. (2003), *Diffusion of Innovation*, 5th Edition, New York, The free Press.
- Shih C. F. et Venkatesh A. (2004), Beyond Adoption: Development and Application of a Use-Diffusion Model, *Journal of Marketing*, 68, 1, 59-72.
- Snyder C. R. et Fromkin H. L. (1980), *Uniqueness: the human pursuit of difference*, New York, Plenum.
- Tepper K., Hoyle R. H. (1996), The latent variables models of need for uniqueness, *Multivariate Behavioural Research*, 31, 4, 467-494.
- Tian K. T., Bearden W. O. et Hunter G. L. (2001), Consumers' need for uniqueness: scale development and validation, *Journal of Consumer Research*, 28, 50-66.
- Touzani M. (1999), L'Innovateur, l'innovatif et le technophile, *Les Cahiers de Recherche*, I.S.C.A.E., *Série Recherche en Sciences de Gestion*, N°2, mars, 69-87.
- Wood S. L. et Swait J. (2002), Psychological indicators of innovation adoption: cross-classification based on need for cognition and need for change, *Journal of Consumer Psychology*, 12, 1, 1-13.

A propos de l'auteur



Achraf SELLAMI est doctorant chercheur en marketing à l'université de Paris 1 – Sorbonne et ATER à l'IUT de Saint-Nazaire au Département Techniques de commercialisation.

L'auteur mène ses recherches sur l'étude du comportement du consommateur spécifique aux nouveaux produits. Il s'intéresse principalement à l'effet des facteurs situationnels comme vecteur explicatif du comportement d'achat d'un nouveau produit.

Matières enseignées : Stratégies de distribution, Marketing Opérationnel et Stratégique, E-marketing et Commerce Electronique, Négociation Commerciale, Simulation d'Entreprise.

Contact : [achraf.sellami\(at\)malix.univ-paris1.fr](mailto:achraf.sellami(at)malix.univ-paris1.fr)

Logiques de réseautage : différences culturelles entre la France et la Chine

Pei LIU

Doctorante – Ater

Chercheur au laboratoire I3M

Département Techniques de commercialisation

IUT de Toulon

Introduction – réseau

Le terme de réseau correspond au sens étymologique du terme jusqu'au XIIe siècle à un « petit filet utilisé pour la chasse et la pêche ». Cette définition au sens propre s'est progressivement enrichie d'un sens figuré pour en arriver au réseau actuel qui désigne des formes entrelacées et interconnectées. Le réseau social est composé de l'ensemble des entités sociales telles que les gens ou les organisations reliées entre eux par différentes relations. Il représente la structure sociale s'assemblant par tous les types de rapports sociaux. Il peut être représenté, comme dans l'analyse des réseaux sociaux par des graphiques appelés réseaux composés de sommets et d'arêtes qui illustrent en général les individus et les divers rapports sociaux existant entre eux.

Nous nous intéressons dans ce travail à la notion de réseautage (networking) qui correspond à la capacité d'acteurs humains à mobiliser les réseaux. Si la notion de réseau se définit de façon très similaire en Chine et en France, le réseautage est au cœur de la culture chinoise. Nous souhaiterions faire ressortir cette spécificité chinoise en proposant un détour à la philosophie chinoise. Nous pourrions ainsi voir les conséquences de ce réseautage dans la vie quotidienne et présenter quelques expérimentations que nous avons conduites pour révéler ces différences culturelles.

Le Guanxi - Le cœur du Réseautage en Chine

A la base du réseautage en Orient, on trouve la notion de Guanxi qui, dans la société chinoise, est comme une vitamine sans laquelle on ne peut pas vivre. Ce terme a fait l'objet d'études nombreuses en gestion, en économie, en sociologie ainsi qu'en anthropologie. Certains chercheurs parlent du Guanxi comme d'une ressource sociale et interpersonnelle (Lovett et al., 1999) que possède une personne dans le but d'avoir certains avantages politiques ou économiques. Il marque la valeur de capital social accumulé par une personne (Warren et al., 2004). D'autres l'associent à l'ensemble des relations ou connexions entre des personnes (Park et Luo, 2001).

En Chine, le Guanxi est mobilisé non seulement pour des raisons professionnelles, mais aussi dans la vie quotidienne. Dès sa naissance, le bébé

profite du Guanxi établi par ses parents (Yan 1996, 2000). C'est un phénomène omniprésent en Chine. Nous pouvons être recrutés pour la seule raison qu'on possède de bons Guanxis (Aufrecht and Bun, 1995). La figure 1 représente le Guanxi d'une personne (figurant au centre) par des cercles concentriques successifs qui correspondent à un certain niveau d'intimité en fonction de leur proximité du centre du cercle.

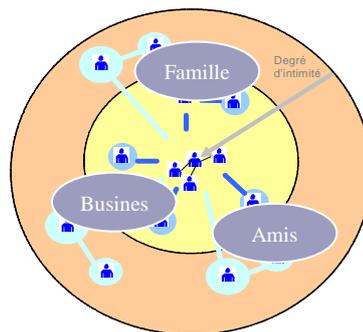


Figure 1 : Guanxi avec différents degrés d'intimité.

Le fait que deux personnes se connaissent ne signifie pas qu'ils ont un Guanxi entre eux. Si A connaît B mais A n'a jamais rendu de service à B et réciproquement, A et B n'ont pas de Guanxi. Le Guanxi demande une obligation mutuelle. Il est considéré par certains chercheurs comme une seconde monnaie en Chine car en tirant profit du bénéfice du réseau, on s'oblige à rendre un service plus qu'équivalent à celui qui nous a été rendu au risque de perdre la face aux yeux du groupe. Le réseau chinois est construit autour d'une personne et tous les autres sont liés à lui par différents types et degrés de Guanxi (familial, amical, professionnel etc.). Plus la personne est proche du centre, plus grande sera l'intimité de Guanxi qu'elle a avec. Le réseau est entretenu soigneusement par son propriétaire qui a une vision claire sur : qui sait quoi, qui connaît qui et qui pense à quoi. Lors qu'on doit agir ou qu'on a un problème à résoudre, le Chinois pense en premier lieu à mobiliser son réseau en mesurant le niveau de Guanxi sur lequel le réseau repose.

Les déterminants de Guanxi dans la philosophie bouddhiste

La spécificité de la culture de Guanxi peut être comprise par l'éclairage de la philosophie orientale. Les Chinois sont influencés par la philosophie bouddhiste et ils croient que tous les phénomènes se posent dans un contexte d'un réseau de sommets mutuellement interdépendants dans l'espace-temps.

Appelons cette interdépendance Yuan, Toute naissance est l'effet de l'arrivée de Yuan ; lors que Yuan part, tout disparaît. (Lai 2003, Cai 1990, Wei 1982, Fo 1992, Duo 1996, 2006) « *Ceci étant, cela devient ; ceci apparaissant, cela naît. Ceci n'étant pas, cela ne devient pas ; ceci cessant, cela cesse de naître.* »⁴

Quelle que soit la forme que nous prenions, quand nous sommes situés dans le monde, nous sommes un nœud dans un espace multidimensionnel (espace-temps). Autrement dit, nous sommes juste des nœuds à l'interconnexion avec un réseau qui reçoit des flèches et ensuite les envoie à d'autres. (Voir Figure 2)

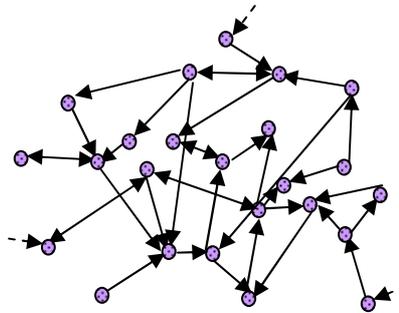


Figure 2 : Web complexe de la causalité et du résultat.

Deux personnes peuvent se connaître ou établir le Guanxi entre elles grâce à Yuan. Comme le "Yuan" produit des résultats, la relation entre les personnes se transforme de cause en effet. Par conséquent, une personne qui connaît beaucoup de gens a beaucoup de "ren yuan". Elle peut produire de nombreux résultats et en tirer des avantages. Ces résultats et les avantages peuvent également être échangés contre d'autres faveurs en vue de parvenir à certaines fins. C'est ce qui se passe au sein d'un réseau informel (Lovette et al., 1999). Puisque le Yuan est puissant, quelqu'un qui possède beaucoup de Guanxi est puissant.

Le déterminant de Guanxi par la philosophie de Sunzu

La culture Guanxi peut également être expliquée par la vision de la force de la situation. M.Suntzu a exprimé dans l'art de la guerre qu'un commandant habile recherche la victoire dans la situation et ne l'exige pas de ses subordonnées. Quelqu'un qui possède de bons Guanxi, peut toujours se positionner lorsque la

⁴ « *Samyutta Nikaya*雜阿含經 »

situation est favorable. *Un commandant habile recherche la victoire dans la situation et ne l'exige pas de ses subordonnés*⁵. Si on considère chaque lien de réseau Guanxi comme un filet d'eau, quelqu'un qui a beaucoup de liens de Guanxi possèdera une force comme l'eau des torrents qui dévale la montagne. *Ainsi, l'énergie (possédant) ... peut être comparée à l'élan des pierres rondes qui roulent en bas d'une montagne de plus de mille mètres de haut*⁶. Donc, bien à l'avance de l'action, les Chinois appliquent une stratégie indirecte qui leur permet d'obtenir cette force de la situation. Ils tracent le chemin de la réussite en marquant une liste nominative de gens sur le chemin. Ils évaluent leur Guanxi avec ces personnages afin de pouvoir préparer un environnement favorable et de transformer une mauvaise situation en bonne situation de façon invisible et silencieuse.

La différence culturelle de réseautage entre France et Chine

La différence entre réseautage en France et en Chine se situe à plusieurs niveaux.

- Dans la culture occidentale, le réseautage est une stratégie pour créer un réseau (Marcon & Moinet 2007) alors que dans la culture orientale le réseautage est un outil au service d'une stratégie. En fonction de différents objectifs, les membres du réseau de Guanxi seront mobilisés en sorte de favoriser le chemin vers la réussite.
- Dans la culture occidentale, le réseautage est socialement dévalorisé alors qu'il est admis, reconnu et valorisé en Chine.
- Enfin la pratique de réseautage est beaucoup plus pratiquée en Orient qu'en Occident. On peut s'en apercevoir lorsqu'on étudie les pratiques professionnelles mais aussi ce qui se passe au niveau de citoyens.

Partie expérimentale

Dans le cadre de la thèse que nous conduisons, nous avons effectué différentes expérimentations prenant la forme d'entretiens qualitatifs, de questionnaires et d'analyses webmétriques. Nous souhaitons resituer ici une analyse webmétrique que nous avons réalisée.

Nous avons raisonné sur un corpus de données composé des messages publiés sur les murs des professeurs chinois et français, laissés respectivement sur le site Renren pour le cas chinois et de Facebook pour le cas français, depuis le 01/01/09. Les données sont donc les traces textuelles laissées sur les murs de deux réseaux sociaux. Nous avons laissé de côté dans cette étude les messages

⁵ « *L'art de la guerre* »

⁶ « *L'art de la guerre* »

liés à la publication de photos, et ceux qui concernent les recommandations quant à l'usage d'applications proposées par les sites (Renren ou Facebook).

Le corpus de données comporte 2 729 messages déposés sur les murs d'une équipe pédagogique de 10 enseignants chercheurs français en sciences de l'information et de la communication (694 messages déposés), et d'une équipe de 10 enseignants chinois en sciences de l'information (2 035 messages déposés).

L'analyse des données a consisté en trois étapes : l'analyse du thème des messages déposés par les professeurs, l'analyse de l'identité du destinataire (s'il s'agit des collègues ou des élèves), et l'analyse de la nature du message déposé par les visiteurs.

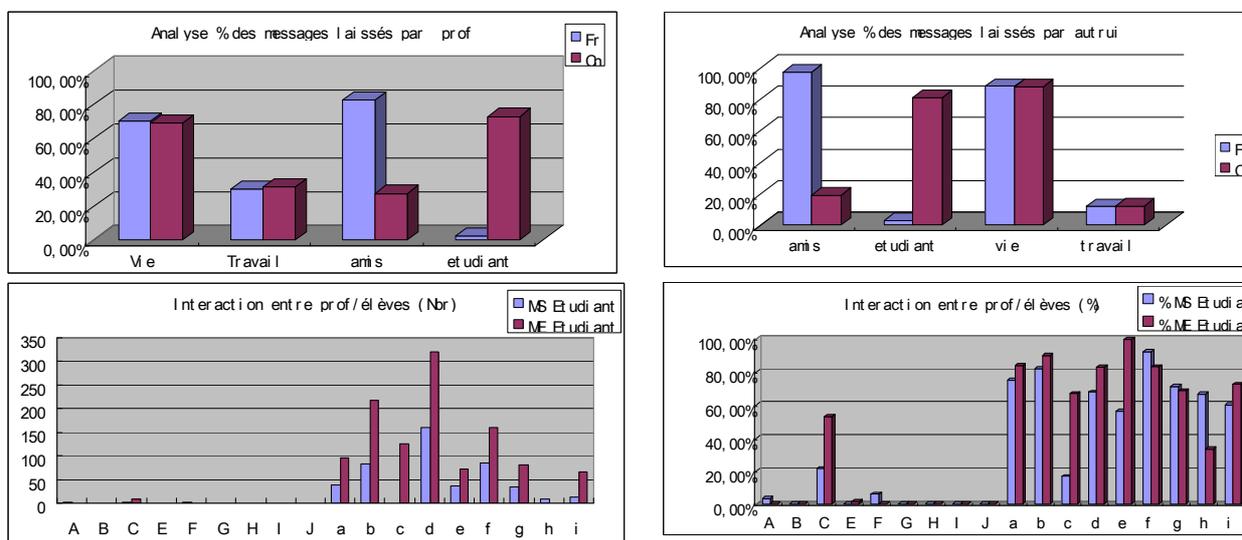


Figure 3 : Analyse de Guanxi à travers de sites 2.0 (Professeurs chinois et français).

** : les lettres distinguées en majuscule et minuscule représentent respectivement les professeurs français et chinois

Conclusions et perspectives

Les premiers résultats montrent les différences significatives quant au type d'échanges prédominant. Nous avons pu observer qu'en France, les professeurs ne vivent pas leur vie virtuelle avec leurs élèves, les étudiants ne s'adressent pas non plus aux professeurs sur Facebook alors qu'il en va différemment en Chine.

Les professeurs français communiquent avec leurs amis ou leurs collègues alors qu'en Chine, 81% des messages publiés sur l'espace des professeurs chinois sont laissés par des étudiants qui leur envoient des civilités, qui les sollicitent lors qu'ils ont des soucis : le professeur donne alors des conseils et encourage les étudiants. L'interaction entre professeurs et élèves en Chine est énergiquement présente dans leur vie 2.0. Sans doute s'agit il une réflexion de la vie réelle et d'un moyen de créer une relation de type Guanxi avec le professeur.

Cette expérimentation confirme la tendance des Chinois au réseautage que la société chinoise vit une culture de stratégie (Arifon, 2006 ; Jullien, 2002). Ce travail pourrait être affiné pour des recherches sur : les réseaux ou la communauté virtuelle ; le comportement sur Internet ; l'analyse comparative entre la vie réelle et virtuelle ainsi l'effet de capital social sur Internet etc.

Bibliographie

- Arifon O., (2006), La culture stratégique de la Chine, un contexte favorable pour une intelligence économique? *Monde Chinois*, n°8, été automne 2006, pp. 61-72.
- Aufrecht, S.E., & Bun, L.S. (1995). Reform with Chinese Characteristics: The Context of Chinese Civil Service Reform. *Public Administration Review* 55, 175-183.
- Cai H.M. (1990), The standpoint of the primitive buddhism (原始佛教的缘起观). *Dharmaghosa (The Voice of Dharma)*, 1990(05), 25-27.
- Duo S. (1996), Some characters of Buddhism different from the other religion. *Tibetan Folklore*, 1996(03), 52-64.
- Duo S. (2006), Several Key Features of the Difference between Buddhism and Other Religions. *N.W.Ethno-National Studies*, 2006(02).
- Fo R. (1992), Dependent origination and nature origination. *Dharmaghosa (The Voice of Dharma)*, 1992(04), 7-15.
- Jullien F., (2002), *Traité de l'efficacité*, Le livre de poche, Paris, 2002.
- Lai Y.H. (2003), The interdependent arising is the fundamental theory of Buddhism. *Social science Front.* 2003(5), 50-52.
- Lovett S., Simmons L. C. & Kali R. (1999), Guanxi Versus the Market: Ethics and Efficiency, *Journal of International Business Studies* 30(2), 231-248.
- Marcon C. & Moinet N., (2007), *Développez et activez vos réseaux relationnels*. Dunod, Paris
- Park, S. H. & Luo Y. (2001), Guanxi and Organizational Dynamics: Organizational Networking in China Firms, *Strategic Management Journal* 22(5), 455-477.
- Warren, D.E., & Dunfee, T.W., & Li, N. (2004). Social Exchange in China: The Double-Edged Sword of Guanxi. *Journal of Business Ethics*, 55: 355-372.
- Wei A. (1982), The dependent origination-the core of Buddhism. *Dharmaghosa (The Voice of Dharma)*, 1982(01), 31-33.
- Yan Y. (1996), *The Flow of Gifts, reciprocity and social network in a Chinese*

village. Stanford.

Yan Y. (2000), *The Flow of Gifts, reciprocity and social network in a Chinese village*. (Version chinoise) Shanghai People Publications, P95-102



LIU Pei est doctorante en Sciences de l'information et de la communication à l'Université du Sud Toulon-Var. Depuis Septembre 2006, elle occupe un poste d'ATER (recherche et auxiliaire d'enseignement) au sein de l'USTV et elle est membre du laboratoire I3M (Information, Milieu, Média, Médiation) de l'USTV et de l'Université de Nice. Elle enseigne la technologie de l'information et de communication dans le département de commercialisation des USTV. Ses intérêts de recherche comprennent l'Intelligence Économique, Sciences-métriques et Réseaux sociaux.

La PSBT optique: Un candidat sérieux pour augmenter le débit sur les installations existantes

Farouk Khecib, Olivier Latry, Mohamed Ketata

Université de Rouen- IUT – LEM.

IUT de Rouen, Rue Lavoisier, 76130 Mont Saint Aignan, France

farouk.khecib@etu.univ-rouen.fr, olivier.latry@univ-rouen.fr,

mohamed.ketata@univ-rouen.fr

ABSTRACT :

The purpose of this work is to investigate and test different modulation format for optimal functioning of optical transmission systems at a 40 Gbit/s bit-rate per channel. Today with advanced technologies it is possible to design new systems for a smooth running at a 40 Gbit/s bit-rate, but it is more interesting to integrate these systems at 40 Gbit/s into links currently operating at 10 Gbit/s . This solution has the advantages of reducing development and new installation link costs.

We focused our work on an existing configuration for metropolitan network in order to follow the robustness to accumulation of ASE noise, chromatic dispersion, PMD and inter-channel non linear effects. As inescapable aspect of the migration of technologies within an optical network is the re-use of the already installed link.

It is clear that the research is directed towards a certain numbers of suitable modulation formats adapted to the architectures already installed in transporting 10 Gbits/s and carrying 40 Gbits/s. The PSBT (Phase Shaped Binary Transmission) all-optical was proposed as the key format to meet these new requirements, is considered as being the promising format for the deployment of 40 Gbit/s technology on existing link at 10 Gbit/s WDM long haul transmission.

RESUME :

L'objet de ce travail est d'étudier et de tester divers formats de modulations pour obtenir un fonctionnement optimal des systèmes de transmissions optiques à un débit de 40 Gbits/s par canal.

Il est possible de concevoir de nouveaux systèmes pour un bon fonctionnement à ce débit, mais il est plus intéressant d'intégrer ces systèmes à 40 Gbits/s dans les liens actuellement en service à 10 Gbits/s.

Cette solution a l'avantage de réduire les coûts de développements et d'installations de nouveaux liens.

Comme l'aspect incontournable de la migration de technologies au sein d'un réseau optique est la réutilisation du lien déjà installé, il est évident que la recherche soit orientée vers un certains nombres de formats de modulation adaptés aux architectures à 10 Gbits/s et transportant du 40 Gbits/s. La PSBT (Phase Shaped Binary Transmission) tout optique a été proposée comme le format clé répondant à ces nouvelles exigences.

MOTS-CLÉS : *Formats de Modulation, On-Off Keying, Differential Phase Shift Keying, Phase Shaped Binary transmission, WDM Wavelength Division multiplexing, systèmes de transmissions optiques mixtes 10/40 Gbit/s.*

1. Introduction

Aujourd'hui, les liens optiques de transmissions utilisent le plus souvent un débit à 10 Gbits/s, mais suite à l'arrivée sur le marché de nouvelles technologies nécessitant plus de débit (accès haut débit, TV numérique haute définition..) la demande en débit ne cesse de croître. Pour améliorer les systèmes actuels et offrir des performances optimales, la recherche dans les laboratoires s'oriente de plus en plus vers l'amélioration des liens transportant les données sur des distances de plus en plus grandes. Cela passe par une amélioration de la couche physique, mais aussi l'optimisation des formats de modulation afin d'augmenter le débit binaire.

Il est très judicieux de mettre en forme les signaux optiques à 40 Gbits/s pour que ceux-ci puissent être transmis sur des grilles WDM/DWDM fonctionnant à 10 Gbits/s. L'utilisation du multiplexage consiste à rapprocher dans le domaine spectral les canaux les uns des autres pour transporter plus d'informations dans une même bande spectrale. Cette réduction de l'espacement inter-canal a pour effet une dégradation de la propagation du signal dans la fibre (augmentation du BER) dû à l'interférence inter-symbole (ISI) qui est assez nuisible notamment sur les formats de modulation d'amplitude OOK (On-Off Keying).

Le format de modulation "PSBT optique" à l'avantage d'avoir une périodicité du filtre FSR qui est égal à l'espace inter-canal en DWDM, et un spectre optique à 40 Gbis/s réduit en taille qui lui permette d'être transmis à la place d'un canal 10 Gbits/s, augmentant ainsi la capacité du lien sans la moindre modification ou changement de fibre.

2. Présentation des formats de modulation

Les systèmes de communications optiques ont principalement utilisé le format de modulation d'amplitude On-Off Keying en le combinant avec NRZ (Non-Return to Zero) ou bien avec RZ (Return-to-Zero). La popularité de ce format de modulation est due à sa simplicité de mise en oeuvre. En effet, pour générer ce format, on a besoin d'un seul modulateur d'amplitude. A la réception une simple photodiode suffit pour la détection. Récemment, plusieurs formats de modulations ont fait leurs apparitions, suite aux limitations que présente le format d'amplitude face aux effets linéaires et non linéaires et à la demande d'augmentation de débit ainsi que des distances de transmissions.

Parmi ces nouveaux formats de modulations, une technique plus avancée pour atteindre des très longues distances est de coder l'information en exploitant la phase du signal optique, cette technique est plus connue sous le nom de DPSK (Differential Phase Shift Keying). Cette technique de modulation est bien plus complexe à mettre en oeuvre, mais néanmoins plusieurs études ont montré que la DPSK présente une très nette amélioration de la sensibilité du récepteur de 3 dB par rapport à la modulation d'amplitude. Elle présente également une très grande robustesse face aux effets non linéaires de la fibre, ainsi que la possibilité de transmettre sur des distances plus longues avec la même qualité.

Plusieurs autres types de formats de modulation ont fait leur apparition afin de réduire l'impact des phénomènes altérant la propagation. Parmi les plus prometteurs, il existe un format de type duobinaire mélangeant le format d'amplitude et de phase. Celui-ci a été développé et breveté par Alcatel sous le nom de PSBT (Phase Shaped Binary Transmission) [2].

Ce type de format consiste en une modulation mixte d'amplitude et de phase obtenue de manière optique au moyen d'un signal DPSK filtré par un interféromètre de Mach-Zehnder (MZI). L'avantage de ce type de format de modulation semble être prometteur en vue de garantir une bonne compatibilité avec l'espacement des canaux à 100 GHz pour les WDM et à 50 GHz pour les DWDM. Ceci est dû à son spectre très réduit, sa grande tolérance à la dispersion chromatique (CD) ce qui se traduit par une augmentation de la distance de transmission, et une bonne résistance à la dispersion modale (PMD).

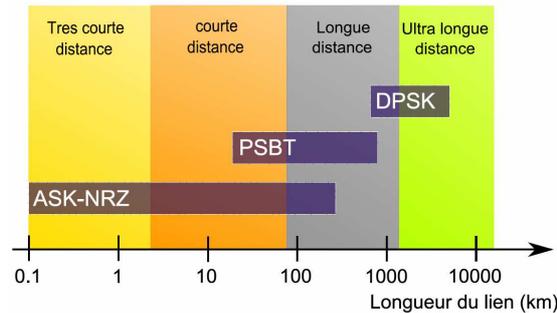


Figure 1: Utilisation des différents formats de modulations à 40 Gbits/s.

La figure (1) est un aperçu sur les distances que peuvent atteindre certains formats de modulation à un débit de 40 Gbits/s. Nous remarquons que la PSBT est moins bonne que la DPSK pour les ultra-longues distances mais le principal avantage qu'offre ce format réside dans sa simplicité. Ce format rend possible la migration vers les hauts débits avec un changement mineur de l'émetteur et une photodiode classique plus rapide en détection sans pour autant changer les lignes de transmissions et les fibres. Ceci garantit une migration en douceur de l'infrastructure de transmission vers les 40 Gbits/s, à moindre coût financier.

3. Description du schéma expérimental

Le multiplexage en longueurs d'ondes WDM a permis une augmentation significative de la capacité des systèmes de transmissions optique. Le principe du multiplexage en longueur d'onde consiste à moduler en parallèle plusieurs sources lasers émettant à différentes longueurs d'ondes plus ou moins rapprochées. Dans notre cas, les longueurs d'ondes se situent dans la bande C entre 1549.31 nm et 1552.52 nm. On les multiplexe, dans la même fibre optique au moyen d'un multiplexeur AWG (Arrayed Waveguide Grating). Grâce à ce multiplexage, nous avons envoyé sur la même fibre deux formats différents, un OOK et une PSBT ou bien DPSK et PSBT. La PSBT optique simulée est composée de transmetteur (Tx), d'un interleaver simulant l'utilisation de la grille WDM, d'une accumulation de dispersion chromatique pure (CD) (fibre dispersive idéale) et un filtre passe bande optique (OPBF) de 1.1 nm comme illustré sur la figure (2). Les autres

canaux sont des OOKs ou bien des DPSKs. Le dispositif de la simulation est détaillé dans [1] dans le cas d'une transmission monocanal.

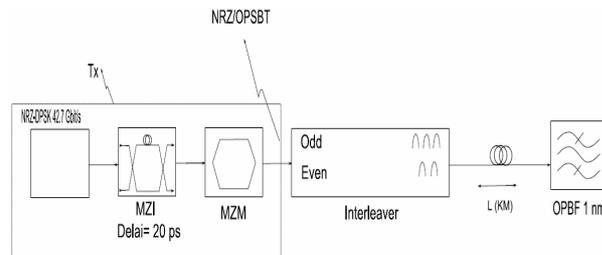


Figure 2 : système de transmission du format PSBT à 40 Gbits/s.

Pour simuler des longues distances de fibres on utilise une boucle de récirculation de tronçons de fibre. Notre boucle de simulation est composée de quatre (dix) tronçons de 60.74 km de fibre donnant un total de 242 (600) km. Chaque tronçon comporte (4(10)x50km) de fibre SMF suivi d'un amplificateur EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), de fibre DCF de longueur (4(10)x10.47km) pour la compensation de la dispersion chromatique de la fibre SMF, suivi encore par un deuxième EDFA avec un facteur de bruit (NF, Noise Figure) égal à 6 dB. Le gain de l'EDFA est fixé pour compenser les pertes dans chaque tronçon et pour garder un niveau de puissance constant à l'entrée de la fibre DCF afin de réduire les effets non linéaires, La dispersion chromatique et diaphonie (crosstalk). Au niveau du récepteur, la détection d'intensité est effectuée par une photodiode PIN suivie par un filtre de Bessel de 5^{ème} ordre de bande passante 0.75 R (R est le débit binaire). D'autre part pour la bonne détection de la PSBT, avant la photodiode PIN, nous introduisons un filtre passe bande optique de 1 nm pour limiter les bruits.

Pour évaluer la qualité de la transmission, les données reçues sont comparées avec une séquence PRBS de 2^7-1 (Pseudo Random Binary Sequence) initiale. Le taux d'erreur binaire BER est mesuré par un analyseur de BER (BER analyzer) connecté directement au filtre passe bas de Bessel.

4. Résultats et Discussions

Pour une transmission sur cinq canaux WDM c'est à dire à un espacement entre canaux de 100 GHz dans la bande C à un débit binaire égal à 10 Gbits/s, nous avons réussi à optimiser la transmission sur un lien optique et

augmenter de ce fait le facteur Q.

Nous avons effectué plusieurs simulations sur le même lien de transmission optique. Premièrement, nous avons simulé un système WDM constitué uniquement de formats de modulation d'amplitude OOK à 10 Gbits/s pour une distance de 240 km (600 km). Les résultats de la simulation nous donne des facteurs Q entre 8.01 et 12.73 (7.70 et 9.1). Chaque canal a pratiquement le même diagramme de l'œil et les valeurs de Q sont proches. Nous constatons une légère dégradation du canal central par rapport aux autres canaux; ceci est dû à l'élargissement des spectres des autres canaux et à l'effet d'interférence.

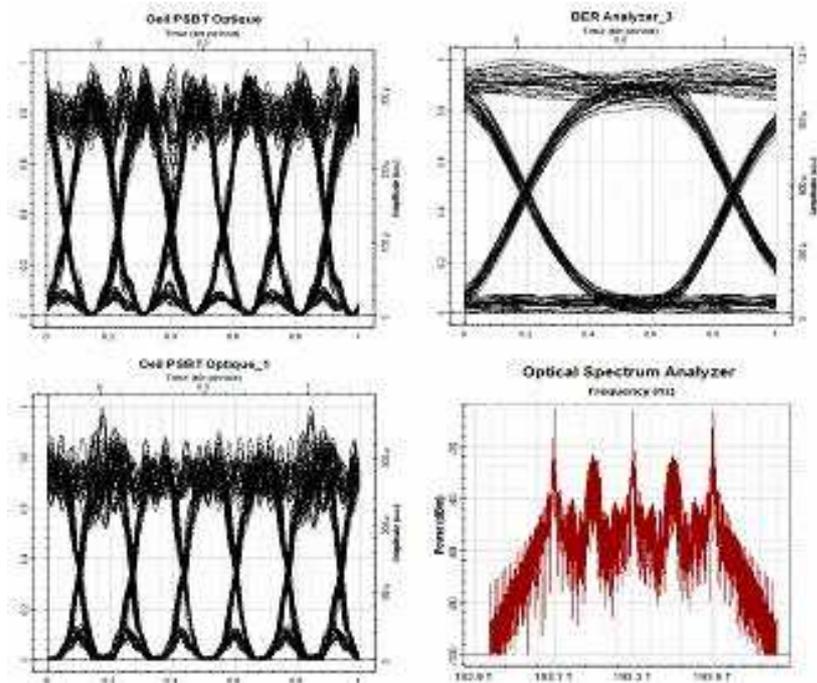


Figure 3 : Diagramme de l'œil et spectre simulations OOK.

Ensuite, nous insérons le format PSBT avec un débit de 40 Gbits/s au milieu des canaux OOK à 10 Gbits/s. Le même lien optique et la même puissance des lasers sont utilisés pour cette transmission.

Les résultats obtenus par simulation donnent un facteur Q entre 14.5 et 19.20 (8.58 et 13.92). Cette nette amélioration du facteur Q est due à la bonne répartition du spectre de la PSBT, spectre réduit par rapport à celui de la OOK. Il y'a moins de perturbation sur les canaux adjacents.

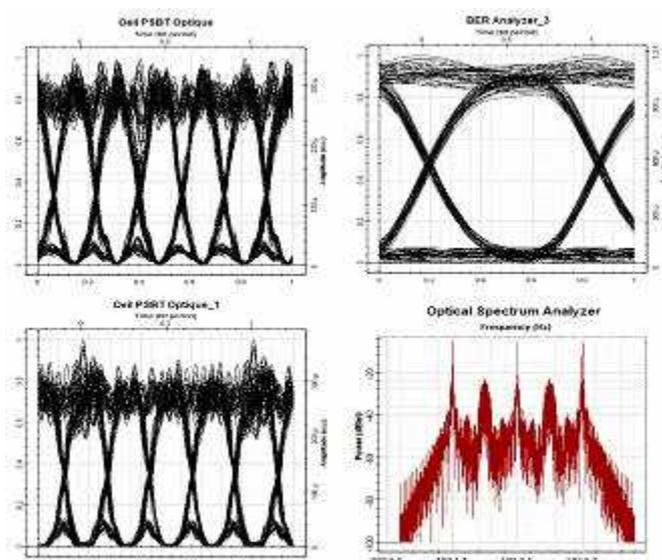


Figure 4 : Diagramme de l'œil et spectre simulations OOK/PSBT.

Nous remarquons même une augmentation du facteur Q de l'OOK par rapport à la simulation précédente, puisque il passe de 9.1 à 19.2 (minimum de 6 pour un BER de 10^{-9}). Dans la dernière étape de simulation, nous insérons un autre format de modulation DPSK à 40 Gbits/s au milieu de canaux OOK à 10 Gbits/s.

Ces simulations sont effectuées pour servir comme un moyen de comparaison entre les deux performances de chacun des formats PSBT/DPSK à 40 Gbits/s au milieu des canaux OOK pour les longues distances notamment. Comme pour les précédentes simulations, le lien optique et les puissances des lasers restent inchangés.

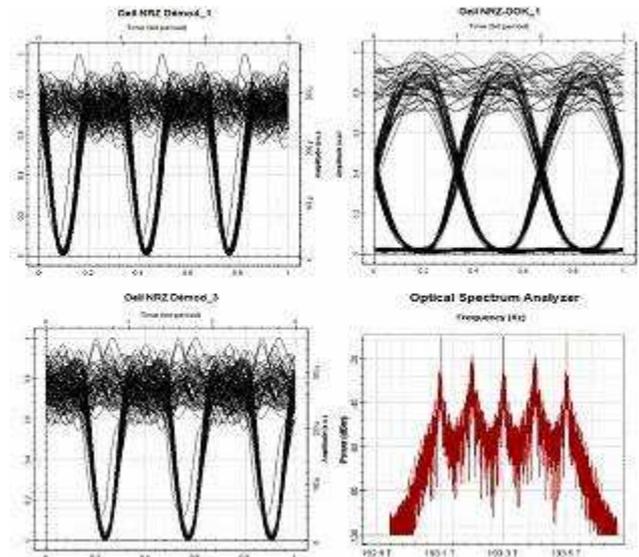


Figure 5 : Diagramme de l'œil et spectre simulations OOK/DPSK.

Les résultats obtenus montrent que le facteur Q est entre 9.17 et 13.16 (7.76 et 13.7), nous remarquons une légère diminution du facteur Q par rapport à la performance de la PSBT. Même si le format DPSK est préconisé pour les ultra longues distances à des débits élevés tel que 40 Gbits/s, il affiche ici une performance moindre que celle de la PSBT dans un système WDM de cinq canaux.

Cette mauvaise performance affichée par le format DPSK est due à son spectre qui est très large en le comparant à celui de la PSBT. Son spectre déborde sur les canaux adjacents, créant ainsi des interférences et de la perte du signal.

Comme illustré sur la figure (1), la PSBT est très bonne dans la gamme des longues distances dû à son spectre très réduit, en conséquence, les canaux adjacents au format PSBT sont moins affectés par les interférences inter symbole (ISI), ce qui donne à ce format un rôle très important dans les réseaux métropolitains et pourquoi pas dans les réseaux sous marins à l'échelle d'une mer comme la Méditerranée par exemple.

5. Conclusion

Les résultats obtenus montrent une alternative prometteuse pour améliorer un lien de transmission optique existant en utilisant un format robuste et étroit comme la PSBT.

La question qui se pose est la suivante: est ce que le format duo-binaire PSBT (Phase Shaped Binary Transmission) est un bon candidat pour les longues distances. Pour éviter de remplacer les installations déjà existantes et garder la même puissance des lasers. Nous montrons ici différents résultats de simulations d'un lien WDM.

Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque la PSBT à 40 Gbits/s est mise entre des canaux OOK à 10 Gbits/s. Si nous comparons ces résultats à ceux que présente le format OOK à 10 Gbits/s ou la DPSK à 40 Gbits/s, ces deux derniers formats présentent des performances moins bonnes que celle de la PSBT.

Le format PSBT à 40 Gbits/s avec les mêmes puissances lasers présente une bonne solution pour les longues distances avec un meilleur facteur Q.

Bibliographie

F. Khcib, O. Latry, P. Dherbecourt, .Ketata "Upgraded optical link by mixing STM-16 and STM-64 with OOK and PSBT in WDM system" in N.Calloas, editor, WMSCI 2008, Volume V, pages 263-268 Orlando, July 2008

Peninckx D, Chbat M, Pierre L et al. "The phased-shaped binary transmission (PSBT): A New technique to transmit far beyond the chromatic dispersion limit", IEEE Photonics Technology Letters Volume 9 issue 2 Pages : 259-261 Published: FEB 1997.

G. Ducournau, O. Latry, M. Ketata " LaPSBT optique surmodulée pour les communications optiques mixtes 10Gbit/s-40 Gbit/s", JNOG2006 à Metz, Novembre 2006.



Farouk Khcib est ingénieur en télécommunication depuis 2003. Il est titulaire d'un Master Ondes, Signaux et Micro-électronique de l'Université de Rouen en 2005. Depuis 2006, il est doctorant à l'Université de Rouen. Il était membre du laboratoire Durabuild en 2005 puis du LEMI (Laboratoire Electronique Micro-technologie et Instrumentation) où il a travaillé sur les formats de modulation pour les télécommunications optiques. Fin 2009, il a rejoint le Groupe de Physique des Matériaux UMR CNRS 6634. Ces principaux intérêts de recherche portent sur les formats de modulation, les systèmes de communications optiques, les interféromètres tout-fibre, les réseaux métropolitain et la PSBT.



Olivier Latry est diplômé de l'ESIGELEC en 1991 puis d'un doctorant en Physique à l'Université de Rouen en 1995. Il était au LCIA à l'INSA de Rouen en 1995 et 1998 où il a travaillé sur les capteurs à fibre optique. Il est l'un des fondateurs du laboratoire LEMI en 1998. Ces principaux sujets de recherche portent sur les formats de modulation dans les communications numériques, les effets de polarisations dans les télécommunications optiques, l'instrumentation optique, l'interférométrie optique. Depuis 2008, il a rejoint le "Groupe de Physique des Matériaux" à l'Université de Rouen où il a commencé une reconversion thématique sur la fiabilité en micro-électronique (transistors RF).



Pascal Dherbécourt est enseignant et chercheur dans le domaine des fibres optiques et des télécommunications radiofréquences depuis 1992 à l'IUT de Rouen. Il est docteur en physique de l'Université de Rouen depuis 2002. Il a intégré le laboratoire LEMI de 1998 à 2008 où il a travaillé sur les systèmes de télécommunications à fibre optiques et en instrumentation. Fin 2008, il rejoint le "Groupe de Physique des Matériaux" à l'Université de Rouen où il travaille sur la fiabilité en micro-électronique (transistors RF de puissance).



Mohamed Kétata a reçu un Master dans le domaine des micro-ondes et l'optronique de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), France, en 1982 et un doctorat en optronique de l'Ecole Centrale de Paris, France, en 1986. Il a débuté ses recherches au LCIA (Laboratoire Capteurs, Instrumentation et Analyse) à l'INSA de Rouen sur les capteurs à fibres optiques. Il a créé le Laboratoire LEMI en 1998 et il en a été le directeur depuis 1998.

Estimation récursive de la densité pour un processus fortement mélangé

Aboubacar Amiri

Département STID, IUT d'Avignon,
Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse,
aboubacar.amiri@univ-avignon.fr

ABSTRACT

Let $(X_t, t \in \mathbb{N})$ be a \mathbb{R}^d -valued α -mixing process, where the X_t 's have the same unknown density f . We suggest to estimate f , recursively, from the data X_1, \dots, X_n . So, we introduce a subfamily of the general recursive kernel estimators initiated by Deheuvels (1974), including the most popular recursive estimators. For this subfamily, we establish the exact asymptotic square error and then we introduce criteria for comparison that allow us to make a choice among our estimators.

KEY WORDS : non parametric estimation, recursive kernel estimators, strong-mixing process.

RESUME

Soit $(X_t, t \in \mathbb{N})$ un processus α -mélangeant, où les X_t sont des vecteurs de \mathbb{R}^d de même loi, de densité de probabilité inconnue f . Nous nous proposons d'estimer f de manière récursive à l'aide des observations X_1, \dots, X_n . Pour cela, nous considérons une sous-famille des estimateurs récursifs généraux initiés par Deheuvels (1974), incluant les estimateurs récursifs les plus utilisés. Pour cette sous-famille, nous obtenons l'erreur quadratique asymptotique exacte, ensuite, nous introduisons des critères de comparaison qui nous permettent de classer et comparer nos estimateurs.

MOTS CLÉS : estimation non paramétrique, estimateurs récursifs à noyaux, processus mélangés.

1. Cadre général et motivations

Nous considérons un processus à temps discret X_1, \dots, X_n et on s'intéresse au problème de la prévision de X_{n+1} . On peut faire appel par exemple à la méthode du lissage exponentiel simple. Celle-ci donne le prédicteur défini par:

$$\hat{X}_{n+1} = (1 - \alpha) \sum_{j=0}^{n-1} \alpha^j X_{n-j}, \alpha \in R.$$

Ce prédicteur peut se calculer de manière récursive par :

$$\hat{X}_{n+1} = \alpha \hat{X}_n + (1 - \alpha) X_{n+1}. \quad (1)$$

Cette relation montre que la valeur prédite à l'instant $(n+1)$ est une moyenne pondérée entre la valeur estimée faite en n et la dernière observation de la série.

L'avantage de cette récursivité est que l'on n'a pas à relisser de nouveau le processus lorsqu'une nouvelle observation s'ajoute à la série. Notre motivation principale est de faire de la prévision non-paramétrique par noyau en conservant une propriété de récursivité comme (1). Ainsi, si l'on suppose que le processus est markovien, strictement stationnaire et d'ordre 1, on cherche alors à estimer $E(X_{n+1}/X_n)$ par

$$\hat{X}_{n+1} = r_{n-1}(X_n)$$

où $\hat{r}_{n-1}(x)$ est l'estimateur de la régression à noyau de $E(X_i/X_0 = x)$ basé sur les observations (X_i, X_{i+1}) pour $i = 1, \dots, n-1$. Pour cela on se propose d'estimer la régression de manière récursive et donc nous devons d'abord estimer la densité de manière récursive.

2. Introduction

Soit $(X_t, t \in N)$ un processus à valeurs dans R^d , α -mélangeant. Les X_t sont supposés équidistribués de densité f inconnue. Parmi les estimateurs les plus utilisés pour estimer f à partir des observations X_1, \dots, X_n , il y a les

histogrammes et les polygones de fréquences. L'histogramme mobile est un cas particulier du célèbre estimateur à noyau introduit par Rosenblatt (1956) et Parzen (1962) défini par

$$f_n^{\text{PR}}(x) := \frac{1}{nh_n^d} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h_n}\right).$$

L'étude de cet estimateur a donné lieu à une vaste littérature statistique. Nous nous intéressons aux estimateurs récursifs introduits pour la première fois par Wolvertone Wagner (1969) et Yamato (1972) sous la forme

$$f_n^{\text{WW}}(x) := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^d} K\left(\frac{x - X_i}{h_i}\right).$$

De nombreuses variantes récursives ont également été proposées et étudiées depuis. En particulier, Deheuvels (1973, 1974) s'est intéressé à la famille

$$f_n^H(x) := \left(\sum_{i=1}^n h_i H(h_i) \right)^{-1} \sum_{i=1}^n H(h_i) K\left(\frac{x - X_i}{h_i}\right).$$

3. Présentation de l'estimateur

Nous proposons la sous-famille paramétrique d'estimateurs récursifs à noyau définie par:

$$f_n^\lambda(x) := \frac{1}{\sum_{i=1}^n h_i^{d(1-\lambda)}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^{d\lambda}} K\left(\frac{x - X_i}{h_i}\right), \lambda \in [0, 1]$$

qui correspond pour $d = 1$ au cas $H(u) = u^{-\lambda}$. Pour tout $\lambda \in [0, 1]$, $(f_n^\lambda(x))$ peut se calculer de manière récursive par

$$f_{n+1}^\lambda(x) = \frac{\sum_{i=1}^n h_i^{d(1-\lambda)}}{\sum_{i=1}^{n+1} h_i^{d(1-\lambda)}} f_n^\lambda(x) + K_{n+1}^\lambda(x - X_{n+1}) \text{ avec } K_i^\lambda(\cdot) := \frac{1}{h_i^{d\lambda} \sum_{j=1}^i h_j^{d(1-\lambda)}} K\left(\frac{\cdot}{h_i}\right).$$

Nous donnons ici, les biais, variance et erreur quadratique asymptotiques exacts de $f_n^\lambda(x)$, en fonction de λ , ensuite nous introduisons trois critères de comparaison qui nous permettent de préférer ou non notre sous-famille à

l'estimateur à noyau habituel et aussi de classer nos estimateurs en fonction de la valeur de λ . Mais pour cela, nous avons besoin des hypothèses suivantes.

Hypothèse H_1 :

- (i) $K : R^d \rightarrow R$ est une densité de probabilité, strictement positive, symétrique et bornée;
- (ii) $\lim_{\|x\| \rightarrow \pm\infty} \|x\|^d K(x) = 0, \forall x \in R^d$;
- (iii) $\int_{R^d} |v_i v_j| K(v) dv < \infty, i, j = 1, \dots, d$.

L'hypothèse H_1 est une hypothèse classique vérifiée en particulier par les noyaux d'Epanechnikov, Gaussien etc.

Hypothèse H_2 :

- (i) $h_n \downarrow 0$ et $nh_n^{d+2} \rightarrow \infty$ lorsque $n \rightarrow \infty$;
- (ii) $B_{n,r} := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i}{h_n} \right)^r \rightarrow \beta_r < \infty, n \rightarrow \infty \forall r \in]-\infty, d+2]$.

L'hypothèse $H_2(ii)$ est technique, très utile dans nos calculs, et est propre à la récursivité. Elle est souvent utilisée dans la littérature notamment par Yamato (1972), Wegman et Davies (1979), Masry (1986). Elle est vérifiée par la famille de fenêtre de la forme $h_n = cn^{-\nu}, 0 < \nu < \frac{1}{d+2}$.

Hypothèse H_3 :

$f \in C_d^2(b)$, où $C_d^2(b)$ désigne l'ensemble des fonctions $\psi : R^d \rightarrow R$ telles que $\psi^{(2)}$ existe pour toute dérivée partielle d'ordre 2, continue et bornée.

L'hypothèse H_3 est classique dans ce domaine, utilisée par exemple par Bosq (1998) pour l'estimation de la densité avec f_n^{PR} .

Hypothèse H_4 :

2. Le processus (X_t) est $2-\alpha$ -mélangeant avec:

$\alpha^{(2)}(k) \leq \gamma k^{-\rho}$, $k \geq 1$ pour deux constantes strictement positives γ et ρ .

3. Pour chaque couple (s, t) , $s \neq t$, le vecteur aléatoire (X_s, X_t) admet une densité $f_{(X_s, X_t)}$ telle que $\sup_{|s-t| \geq 1} \|g_{s,t}\|_\infty < \infty$ où $g_{s,t} := f_{(X_s, X_t)} - f \otimes f$.

Un processus $(X_t, t \in \mathbb{N})$ est dit $2-\alpha$ -mélangeant si:

$$\alpha^{(2)}(k) := \sup_{t \in \mathbb{N}} \left\{ \sup_{B \in \sigma(X_t), C \in \sigma(X_{t+u})} |P(B \cap C) - P(B)P(C)| \right\} \rightarrow_{u \rightarrow +\infty} 0.$$

$\sigma(X)$ désigne la tribu engendrée par X .

4. Résultats

Nous pouvons maintenant déterminer les biais, variance et erreur quadratique asymptotiques de notre famille d'estimateurs.

Théorème 4.1. *Sous les hypothèses H_1, H_2, H_3 , et H_3 :*

(a) Pour tout $\lambda \in [0, 1]$, on a
$$h_n^{-4} \left(\mathbb{E} f_n^\lambda(x) - f(x) \right)^2 \rightarrow_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\beta_{d(1-\lambda)+2}}{\beta_{d(1-\lambda)}} \right)^2 b_2^2(x),$$
 avec $b_2^2(x) := \frac{1}{4} \left(\sum_{1 \leq i, j \leq d} \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}(x) \int_d v_i v_j K(v) dv \right)^2$

(b) Pour tout $\lambda \in \left[\left(\frac{d-2}{2d} \right)^+, 1 \right]$, $nh_n^d \text{Var} f_n^\lambda(x) \rightarrow \frac{\beta_{d(1-2\lambda)}}{\beta_{d(1-\lambda)}^2} f(x) \int_d K^2(u) du$, $n \rightarrow \infty$, si $\rho > 2$,

où: $x^+ = \max(x, 0)$.

(c) Si $d \geq 3$ et $\lambda \in \left[0, \frac{d-2}{2d} \right]$, la conclusion du (b) reste encore vraie si $\rho > \frac{d+2}{2}$.

(d) Sous les conditions du (b) (avec $\rho > 2$) ou du (c) (avec $\rho > \frac{d+2}{2}$), le choix

$h_n = C_n n^{-\frac{1}{d+4}}$, $C_n \downarrow c > 0$, entraîne que

$$n^{\frac{4}{d+4}} \mathbb{E} \left(f_n^\lambda(x) - f(x) \right)^2 \rightarrow c^4 \left(\frac{4+d\lambda}{2+d\lambda} \right)^2 b_2^2(x) + \frac{(4+d\lambda)^2 f(x) \|K\|_2^2}{2c^d (4+d)(2+d\lambda)}, n \rightarrow \infty,$$

pour les valeurs respectives de λ en tout point où $f(x) > 0$.

Notons que si l'on précise la forme de h_n , le résultat (c) du théorème 3.1 se réécrit sous la forme:

(c): Si $d \geq 3$ et $\lambda \in \left[\left(1 - \frac{1}{2vd}\right)^+, \frac{d-2}{2d} \right]$, le choix

$h_n = C_n n^{-\nu}$, $C_n \downarrow c > 0$, avec $0 < \nu < \frac{1}{d+2}$, entraîne:

$$nh_n^d \text{Var} f_n^\lambda(x) \rightarrow \frac{(1-\nu d(1-\lambda))^2}{1-\nu d(1-2\lambda)} f(x) \int_d K^2(u) du, n \rightarrow \infty, \text{ si } \rho > 2.$$

5. Comparaison d'estimateurs

Définition 5.1 (Critères de comparaison): Soient $f_n(x)$ et $g_n(x)$ deux estimateurs à noyau de f .

On dira que $f_n(x)$ est préférable à $g_n(x)$ au sens de la variance si:

$$0 \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\text{Var}(f_n(x))}{\text{Var}(g_n(x))} < 1.$$

On dira que $f_n(x)$ est préférable à $g_n(x)$ au sens du biais si:

$$0 \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(E f_n(x) - f(x))^2}{(E g_n(x) - f(x))^2} < 1.$$

On suppose que $f(x) > 0$, on choisit:

$$h_n = C_n n^{-\frac{1}{d+4}}, C_n \rightarrow c > 0, \text{ avec } c = c_{\min}(f_n(x)) \text{ (resp. } c = c_{\min}(g_n(x)) \text{) pour l'estimateur } f_n(x) \text{ (resp. } g_n(x) \text{)}.$$

$c_{\min}(\diamond)$ désigne la constante qui minimise l'erreur quadratique asymptotique de l'estimateur \diamond .

Sous ces conditions, on dira que $f_n(x)$ est préférable à $g_n(x)$ au sens de la moyenne quadratique (ou du MSE) si : $0 \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{E(f_n(x) - f(x))^2}{E(g_n(x) - f(x))^2} < 1$.

Le critère (i) a été introduit par Bannon (1976). Notre premier résultat de cette partie permet de classer nos estimateurs selon les valeurs de λ par les critères précédents.

Théorème 5.2. *On suppose que les hypothèses $H_1 - H_3$ sont vérifiées avec $\rho > \max\left(2, \frac{d+2}{2}\right)$. On choisit $h_n = C_n n^{-\nu}$, $C_n \rightarrow c > 0$, $0 < \nu < \frac{1}{d+2}$.*

Alors:

(a) l'efficacité de $(f_n^\lambda(x))$ est décroissante (resp. croissante) selon le critère de la variance (resp. du biais)

(b) si $f(x) > 0$, et $\nu = \frac{1}{d+4}$, l'efficacité de $(f_n^1(x))$ est croissante selon le critère du MSE.

Notre dernier résultat compare notre famille d'estimateurs à l'estimateur à noyau usuel $f_n^{PR}(x)$.

Théorème 5.3. *On se place sous les hypothèses du théorème 4.2. Alors :*

(a) tous les estimateurs $f_n^\lambda(x)$, $\lambda \in [0,1]$ sont préférable à $f_n^{PR}(x)$ au sens de la variance.

(b) aucun estimateur $f_n^\lambda(x)$, $\lambda \in [0,1]$ n'est préférable à $f_n^{PR}(x)$ au sens du biais.

(c) si $f(x) > 0$, et $\nu = \frac{1}{d+4}$, $f_n^{PR}(x)$ est préférable à tous les estimateurs $f_n^\lambda(x)$, $\lambda \in [0,1]$ au sens du *M.S.E.*, pour les choix "optimaux" respectifs de C .

Bibliographie

Amiri, A. (2009). Sur une famille paramétrique d'estimateurs séquentiels de la densité pour un processus fortement mélangé. C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. I 347, 309-314.

Banon, G. (1976) Sur un estimateur non paramétrique de la densité de probabilité, Revue de statistique appliquée, 24, 4, 61- 73.

Bosq, D. (1998). Non-parametric statistics for stochastic processes. Estimation and prediction, lecture notes in statistics 110 2nd ed. Springer- Verlag, New York.

Bosq, D. and Blanke, D. (2007). Inference and prediction in large dimensions. Wiley Series in prob. and stat. ISBN 978-0-470-08147-1.

Deheuvels, P. (1974). Conditions nécessaires et suffisantes de convergence ponctuelle presque sûre et uniforme presque sûre des estimateurs de la densité. C. R. Acad. Sci. Paris Vol. 278, 1217-1220.

Deheuvels, P. (1973). Sur l'estimation séquentielle de la densité. C. R. Acad. Sci. Paris, Serie A, 276, 1119-1121.

Masry, E. (1986). Recursive probability density estimation for weakly dependent stationary processes, IEEE transaction in information theory, 32, no 2, 254-267.

Parzen, E. (1962). On the estimation of a probability density function and the mode. Ann. Math. Stat. 33, 1065-1076.

Rozenblatt, F. (1956). Remarks on some non-parametric estimates of a density function, Ann. Math. Stat. 38, 482-493.

Wegman, E. and Davies, H.I. (1979). Remarks on some recursive estimators of a probability density, The Annals of statistics , Vol 7, No. 2, 316-327.

Wolvertone, C. and Wagner, T.J. (1969). Recursive estimates of probability densities. IEEE Transactions on systems sciences and cybernetics Vol 5, 307-308

Yamato, H. (1972). Sequential estimation of a continuous probability density function and mode. Bull. Math. Statist. Jap., Vol. 14, 1-12.



Aboubacar AMIRI est né le 20 septembre 1983 aux Comores. Après un Baccalauréat série C (mathématiques et physique), en 2002, il obtient un Diplôme Universitaire d'Etudes Scientifiques (DUES) de maths-physique puis une licence de mathématiques à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal) entre 2002 et 2005. En 2005, il est admis au concours du centre d'appui aux écoles de statistique africaines (CAPESA) afin d'intégrer un cycle d'ingénieur à l'ENSEA de Yaoundé, en Côte d'Ivoire, mais pour des raisons d'instabilité politique, il décide de venir en France en 2005 pour faire une maîtrise de mathématiques et applications à l'Université de Marne-la-Vallée. En 2006-2007, il fait un Master de statistique à Paris 6 et depuis septembre 2007, il effectue, sous la direction de Delphine Blanke (Professeur à l'Université d'Avignon) une thèse intitulée « Méthodes récursives en estimation et prévision ». Il est chargé de TD et TP depuis 2008 au département STID de l'IUT d'Avignon.

Un facteur d'échelle de dureté en nano et microindentation

Johnny Mendoza, Francine Roudet, Jacky Lesage et Didier Chicot

** IUTA – Université Lille 1*

Département Génie Mécanique et productique

Rue de la Recherche-BP 179 59653 Villeneuve d'Ascq Cedex

*jamd43@yahoo.com ; francine.roudet@univ-lille1.fr ;
jacky.lesage@univ-lille1.fr ; didier.chicot@univ-lille1.fr*

**Sections de rattachement : 61,
Secteur : Secondaire / Tertiaire**

RESUME :

Pour représenter l'effet de taille en microindentation, la théorie de Nix et Gao (SGP) basée sur la connaissance des dislocations géométriquement nécessaires pour accommoder la déformation plastique sous l'indenteur est maintenant largement utilisée. Dans le domaine de la nanoindentation, cette théorie ne peut s'appliquer car les valeurs expérimentales des coefficients ne correspondent plus aux calculs théoriques basés sur les paramètres physiques intrinsèques du matériau. Toutefois si on tient compte de l'uniformité du champ de dislocations sous l'indenteur et de l'élargissement de la zone plastique sous les faibles charges d'indentation, nous montrons que ce modèle peut être valablement utilisé sur toute la gamme de charges. De plus, pour mieux mettre en évidence ce passage multi-échelle (nano/micro) en prenant en compte ces phénomènes, nous proposons d'utiliser un facteur d'échelle en dureté. En pratique, ce facteur d'échelle se calcule à partir des coefficients de lissage du modèle SGP. En théorie, il est proportionnel au module de cisaillement et au vecteur de Burgers du matériau avec un coefficient qui dépend de la déformation plastique (arrangement des dislocations et volume de la zone déformée).

MOTS-CLÉS : *Dislocations, Dureté, Plasticité, Effet de taille.*

1. Introduction

En indentation, il est bien connu que la valeur de la dureté dépend de la charge appliquée. Ce phénomène associé à plusieurs causes comme le durcissement par écrouissage, la rugosité, la déformation autour de l’empreinte, la forme de l’indenteur, l’énergie de surface, la variation de composition, l’anisotropie est connu sous le nom d’Indentation Size Effect (ISE) (Cheng et al., 2004). Depuis 1885, de nombreuses relations ont été proposées pour décrire cette dépendance de la dureté avec la charge. Ma et Clarke en 1995 et Nix et Gao en 1998 ont introduit le concept du gradient de déformation plastique (Strain Gradient Plasticity - SGP) basé sur la théorie des dislocations de Taylor. Nix et Gao ont montré que le comportement en dureté de matériaux cristallins peut être bien représenté par le concept des dislocations géométriquement nécessaires (GND) pour accommoder la déformation plastique. La relation que les auteurs proposent en microindentation relie la microdureté, H , à la profondeur d’indentation, h , comme suit :

$$\left(\frac{H}{H_0}\right)^2 = 1 + \left(\frac{h^*}{h}\right) \quad [1]$$

où H_0 est généralement appelé la macrodureté et h^* est une longueur caractéristique représentative de la dépendance de la dureté avec la charge.

Huang et al. (2006), après avoir analysé de nombreux travaux, ont conclu que les résultats obtenus en nanoindentation ne pouvaient être représentés par la relation [1]. Pour expliquer la divergence entre cette relation et les résultats expérimentaux, les auteurs avancent deux facteurs liés à l’effet du défaut de pointe aux faibles pénétrations et/ou au volume de stockage des GND. Pour Huang et al. (2006), l’effet de pointe de l’indenteur ne peut expliquer à lui seul l’effet de taille en nanoindentation. En conséquence, la différence doit principalement provenir de la manière dont a lieu la déformation plastique, densité et arrangement du réseau de dislocations, ou encore du volume de stockage des dislocations. Ainsi pour représenter les résultats de nanoindentation, ces auteurs suggèrent de considérer la densité maximum de dislocations géométriquement disponibles ce qui leur permet de représenter les résultats de dureté en dessous et au dessus d’une valeur limite entre les données de nano et de microindentation. Pour Zong et al. (2006), les données peuvent être séparées en deux zones et représentées par deux droites correspondant à la relation [1]. Ces auteurs donnent donc deux couples de paramètres (H_0 , h^*) pour décrire les résultats de nano et de microindentation. Malheureusement, ils ne donnent pas de sens physiques permettant de comparer les valeurs de macrodureté ($H_{0_{\text{micro}}}$ et $H_{0_{\text{nano}}}$) et de longueurs caractéristiques (h^*_{micro} et h^*_{nano}) calculées aux deux échelles de mesure.

Dans ce travail, nous avons analysé plusieurs résultats de nano et de microindentation obtenus sur différents matériaux cristallins. Nous montrons que

la relation de Nix et Gao est parfaitement adaptée pour représenter le comportement linéaire dans les deux régimes de pénétration. De plus, nous expliquons les différences nano/micro en introduisant la notion d'uniformité d'espacement des dislocations géométriquement nécessaires pour accommoder la déformation plastique et par un accroissement de la taille de zone plastique en nanoindentation bien montrée par Durst et al. (2005) utilisant une analyse par éléments finis. De manière à être plus pertinent encore, nous suggérons d'utiliser un facteur d'échelle en indentation. Ce nouveau facteur permet de discuter du mode de déformation plastique sous l'indenteur.

2. Approche multi-échelle en dureté

2.1. Théorie de Nix et Gao: Strain Gradient Plasticity

La théorie développée par Nix et Gao en 1998 suppose par simplicité que le processus de déformation par indentation est accommodé par les dislocations géométriquement nécessaires en prenant en compte le changement permanent de forme à la surface. Cette densité de dislocations, notée ρ_G , est exprimée en fonction du vecteur de Burgers, b , de la profondeur d'empreinte, h , et de l'angle, θ ($=19.3^\circ$), entre la surface de l'indenteur conique et la surface du matériau :

$$\rho_G = \frac{3}{2bh} \tan^2 \theta \quad [2]$$

A partir de cette densité, du critère de Von Mises, des relations de Tabor et de Taylor, Nix et Gao proposent d'exprimer Ho et h^* de la relation [1] comme suit:

$$Ho = 3\sqrt{3}\alpha\mu b\sqrt{\rho_s} \quad \text{et} \quad h^* = \frac{81}{2}b\alpha^2 \tan^2 \theta \left(\frac{\mu}{Ho} \right)^2 \quad [3]$$

où α est une constante qui prend une valeur comprise entre 0,3 et 0,5 selon la théorie de Taylor. μ est le module de cisaillement et ρ_T la densité totale de dislocations qui peut être séparée en deux termes, ρ_G et ρ_s étant la densité de dislocations statistiquement stockées.

Selon Nix and Gao (1998), h^* n'est pas une constante pour un matériau donné et une géométrie d'indenteur donnée puisque ce paramètre dépend des dislocations statistiquement stockées, paramètre que l'on rencontre au travers de la macrodureté, Ho .

Les relations [3] sont généralement bien admises pour représenter l'effet de taille en microindentation. Pourtant, Nix et Gao ont ajouté que l'hypothèse d'un indenteur ayant un angle constant n'est pas entièrement exacte pour supposer que le gradient de déformation est constant. Ceci est particulièrement vrai au début de la déformation plastique lorsque la pointe de l'indenteur pénètre à la surface du

matériau dû à son défaut de pointe. Dans ce cas, l'espacement des dislocations n'est pas uniforme du fait de la courbure de la pointe de l'indenteur.

A cela s'ajoute une extension de la zone plastique sous faibles charges d'indentation (Durst et al., 2005). Ceci se traduit par une augmentation de la densité de GND au voisinage du sommet de l'indenteur. Pour traduire l'extension de la zone de déformation, Durst et al. (2005) font intervenir un coefficient correctif, f , dans le calcul de ρ_G . Ce coefficient f vaut 1,9 pour ces auteurs mais il prend la valeur de 1,44 si on se reporte aux travaux de Nix et Gao (1998) :

$$\rho_{G \max} = \frac{3}{2bh} \frac{1}{f^3} \tan^2 \theta \quad [4]$$

Ainsi, en remplaçant ρ_G par $\rho_{G \max}$ et en suivant la même démarche que Nix et Gao, nous exprimons la longueur caractéristique en nanoindentation qui ne diffère de la relation [3] que par le facteur f^3 :

$$h^* = \frac{81}{2} \frac{1}{f^3} b \alpha^2 \tan^2 \theta \left(\frac{\mu}{Ho} \right)^2 \text{ avec } Ho = 3\sqrt{3} \alpha \mu b \sqrt{\rho_s} \quad [5]$$

Ainsi pour résumer, les calculs de Ho et de h^* en microindentation se font avec les relations [3] tandis qu'en nanoindentation, ils se font avec les relations [5].

2.2. Le facteur d'échelle en dureté

Au contraire de ce qu'ont avancé Huang et al. (2006), nous pensons que les résultats obtenus par Feng et Nix (2004) peuvent être représentés par deux droites en nano et en microindentation en utilisant la relation [1] comme l'ont proposé Zong et al. (2006). Cette hypothèse se confirme d'ailleurs l'oxyde de magnésium présenté sur la figure 1 où les deux régions nano et micro sont clairement distinctes.

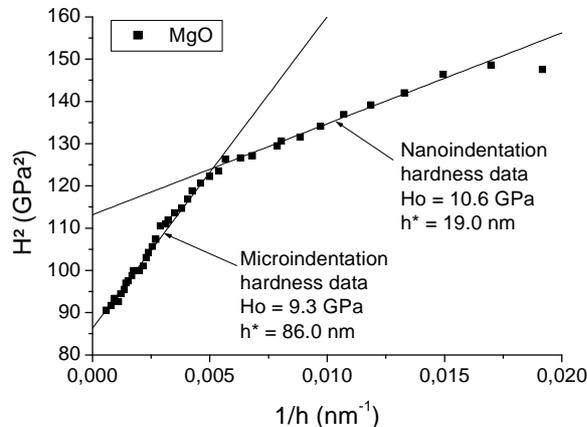


Figure 1 : Carré de la dureté, H^2 , en fonction de l'inverse de la profondeur d'empreinte, $1/h$, pour le MgO.

Les grandeurs H_o et h^* sont déterminées par régression linéaire. Dans le domaine de microindentation, les résultats donnent 9,3 GPa pour la macrodureté, $H_{o_{\text{micro}}}$, et 86 nm pour la longueur caractéristique, h^*_{micro} . Pour l'oxyde de magnésium, Huang et al. (2006) donnent 126 GPa pour le module de cisaillement et 0,298 nm pour le vecteur de Burgers. A partir de la macrodureté expérimentale et de la relation [3], il est possible de calculer la valeur théorique de la longueur caractéristique. Le calcul conduit à 71 nm qui est proche de la valeur expérimentale de 86 nm. De la même manière, si on applique ce raisonnement aux valeurs de nanoindentation en appliquant la relation [5]. En prenant $H_{o_{\text{nano}}}$ égal à 10,6 GPa, on trouve h^*_{nano} théorique égale à 18,2 nm en prenant $f = 1,44$ (Nix et al., 1998) ou égale à 8 nm avec $f = 1,9$ (Durst et al., 2005). La valeur expérimentale de ce paramètre étant de 19 nm, c'est la valeur de f de Nix et Gao qui est validé en tous cas pour ce matériau. Ce résultat montre que le modèle SGP peut être valablement appliqué en micro et en nanoindentation si on tient compte de l'uniformité du réseau de dislocations et de l'accroissement de la zone plastique en nanoindentation. Pour la suite, les calculs seront faits en prenant $f = 1,44$.

D'autre part, il est clair que la comparaison entre les deux couples de points $(H_o = 9,3 \text{ GPa}, h^* = 86 \text{ nm})_{\text{micro}}$ et $(H_o = 10,6 \text{ GPa}, h^* = 19 \text{ nm})_{\text{nano}}$ n'est pas possible directement. C'est pourquoi nous proposons d'étudier les deux droites de la figure 1 en utilisant une nouvelle approche. Nous reprenons donc la relation [1] en écrivant le carré de la dureté en fonction de l'inverse de la profondeur d'indentation. La pente de la droite fait apparaître une combinaison de la macrodureté et de la longueur caractéristique comme suit :

$$H^2 = H_o^2 + \frac{H_o^2 \cdot h^*}{h} \quad [6]$$

D'un point de vue purement physique, la pente égale à $H_o^2 \cdot h^*$ n'est pas pertinente car l'unité n'est pas conventionnelle ou au moins inhabituelle. C'est pourquoi nous proposons d'en prendre la racine carrée pour écrire le facteur d'échelle en dureté, H_{LSF} (LSF pour Length-Scale Factor) :

$$H_{LSF} = \sqrt{H_o^2 \cdot h^*} = H_o \sqrt{h^*} \quad [7]$$

qui s'exprime en $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, cette unité étant équivalente à celle d'une ténacité. En utilisant la relation [3], nous écrivons théoriquement H_{LSF} en microindentation:

$$H_{LSF \text{ micro}} = \frac{9}{\sqrt{2}} \alpha \tan \theta \cdot \mu \sqrt{b} = 2,278 \cdot \alpha \cdot \mu \sqrt{b} \quad [8]$$

Et en nanoindentation, en appliquant la relation [5] avec $f = 1,44$:

$$H_{LSF \text{ nano}} = \frac{3\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \alpha \tan \theta \cdot \mu \sqrt{b} = 1,135 \cdot \alpha \cdot \mu \sqrt{b} \quad [9]$$

qui diffère de la relation [8] uniquement par le facteur $\sqrt{3}$.

Les relations [8] et [9] montrent que le paramètre H_{SLF} est proportionnel au produit $\mu \sqrt{b}$ avec un facteur égal à $2,278 \alpha$ ou $1,315 \alpha$ selon que le réseau de dislocations soit uniforme or non. En prenant α égal à 0,5, nous pouvons calculer les valeurs expérimentales et théoriques du facteur d'échelle en dureté (Nix et al., 1998).

En microindentation sur l'oxyde de magnésium (MgO), le facteur théorique est égal à $2,48 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ alors qu'il est de $2,73 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. En nanoindentation, l'écart est encore plus faible puisque la théorie et l'expérience prévoit respectivement 1,43 et $1,46 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. Pour consolider cette approche et confirmer la valeur du coefficient α , nous calculons le facteur d'échelle en dureté de plusieurs matériaux cristallins.

3. Application du facteur d'échelle à différents matériaux cristallins

Pour discuter de la pertinence du facteur d'échelle en dureté, nous avons analysé plusieurs données d'indentation obtenues en nano et en microindentation sur différents matériaux cristallins (Ma et al., 1995, Nix et al., 1998, Huang et al., 2006, Lou et al., 2006; Qin et al., 2007). Le tableau 1 rassemble ces valeurs avec celles du module de cisaillement et du vecteur de Burgers.

Matériaux	μ (GPa)	b (nm)	Ho_{nano} (GPa)	h^*_{nano} (μm)	Ho_{micro} (GPa)	h^*_{micro} (μm)
Ag (100)	26,4	0,286	---	---	0,340	0,757
Ag (110)			---	---	0,361	0,432
Cu (111)	42	0,256	---	---	0,581	1,600
Cu			---	---	0,834	0,464
MgO	126	0,298	10,6	0,019	9,3	0,086
Ni	76	0,25	1,24	0,34	0,76	3,05
Ag	33,6	0,29	0,71	0,26	0,25	5,42
Au	30,4	0,29	1,02	0,06	0,28	4,66
LIGA Ni	73	0,25	---	---	2,6	0,34
Ir	217	0,27	---	---	2,47	2,89

Tableau 1. Valeurs du module de cisaillement, μ , du vecteur de Burgers, b , de la macrodureté, Ho , et de la longueur caractéristique, h^* , obtenues en nano et en microindentation sur différents matériaux cristallins.

A partir de ce tableau de valeurs, nous représentons le produit expérimental $Ho\sqrt{h^*}$ en fonction du produit théorique $\mu\sqrt{b}$ (Figure 2).

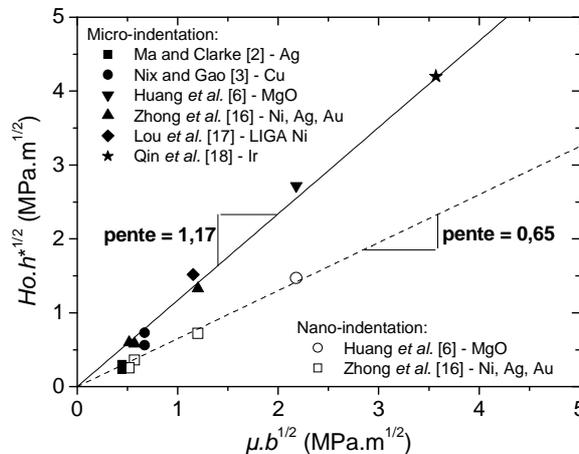


Figure 2 : Représentation de la valeur expérimentale du facteur d'échelle en dureté $Ho.h^{*1/2}$ en fonction du produit théorique $\mu.b^{1/2}$ pour les différents matériaux analysés.

Les points issus de la microindentation sont bien représentés par une droite de pente 1,17. A partir du coefficient 2,278 α de la relation [8], le calcul de α donne la valeur 0,51 qui est très proche de 0,5 donnée par Nix et Gao (1998). En

nanointentation, les données de dureté s'alignent également sur une droite mais avec une pente plus faible égale à 0,65. En utilisant la relation [9] relative à la nanointentation, le calcul de α donne une valeur de 0,49 également très proche de 0,5. Ce résultat est très intéressant car il valide notre approche sur les deux échelles de mesure, nano et micro, mais aussi la théorie de Nix et Gao (1998) en validant la valeur du coefficient α . Il permet de plus de comprendre et d'expliquer la différence observée entre les couples de points $(H_o, h^*)_{\text{micro}}$ et $(H_o, h^*)_{\text{nano}}$ résultant respectivement d'analyses de dureté en microindentation et en nanointentation. Ce résultat montre aussi que le champ de dislocations est plutôt uniforme en microindentation alors qu'il ne l'est pas en nanointentation. Enfin, ce résultat semble indiqué que la valeur du coefficient est indépendante de la nature du matériau au contraire de ce que prévoit la théorie de Taylor sur la variation de ce coefficient entre 0,3 et 0,5 mais des analyses supplémentaires doivent être faites pour valider ce résultat. Enfin, ce résultat confirme que f est égal à 1,44.

D'un point de vue physique, il convient d'expliquer la différence de comportement aux deux échelles de mesure par la répartition des dislocations sous l'indentateur et la différence de taille de zone plastique.

La nanointentation correspond au début du processus de déformation plastique. Dans ce cas, les dislocations sont générées dans un champ non uniforme principalement localisée au voisinage de la pointe de l'indentateur. Ainsi, du fait de l'arrondi de la pointe du pénétrateur important à cette échelle, le glissement des dislocations prend place dans des directions normales à la surface de l'indentateur. Lorsque la charge d'indentation augmente, le rayon de la zone plastique augmente. Par conséquent, l'arrangement des dislocations tend à être homogène dans le voisinage de l'empreinte face à l'extension de cette zone plastique. On peut raisonnablement envisager que les dislocations sont rassemblées dans une région localisée en bout d'indentateur et dans un volume de déformation plus grand par rapport aux dimensions de l'empreinte en accord avec les observations de Durst et al. (2005). Cette représentation fait converger ces deux approches.

Enfin, comme on peut le voir sur la figure 2, la transition entre les zones nano et microindentation est abrupte. Comme la transition ne s'étend que sur quelques nanomètres, les relations [8] et [9] suffisent pour représenter les deux régimes de l'indentation. Ces relations permettent également de donner des renseignements complémentaires sur les résultats obtenus. En effet, il est clairement montré sur la figure 2 que les points obtenus par Ma et Clarke (carrés noirs) ne sont pas alignés sur la droite de microindentation comme le prévoit la théorie et la relation [8]. Par conséquent, nous pouvons supposer un problème qui pourrait être par exemple lié à la préparation des échantillons. Il est en effet bien connu que le polissage introduit un écrouissage superficiel qui modifie le réseau de dislocations (Chicot et al., 2007).

4. Conclusion

En conclusion, le modèle de Nix et Gao est capable de représenter les données de dureté aussi bien en microindentation qu'en nanoindentation si la notion d'uniformité du champ de dislocations et l'augmentation du volume de la zone plastique en nanoindentation sont prises en compte dans le modèle original. Le facteur d'échelle que nous avons introduit en dureté nous donne des renseignements précieux sur la déformation plastique sous l'indenteur. En effet, le calcul expérimental à partir des coefficients de la relation de Nix et Gao et le calcul théorique à partir du module de cisaillement et du vecteur de Burgers du matériau sont reliés par un coefficient dépendant du régime de pénétration.

Bibliographie
Cheng Y.T., Cheng C.M., "Scaling, dimensional analysis, and indentation measurements", *Mater. Sci. and Eng. R: Reports*, vol. 44, n° 4-5, 2004, p. 91-149.

Chicot D., Roudet F., Soom A., Lesage J., "Interpretation of instrumented hardness measurements on stainless steel with different surface preparations", *Surf. Eng.*, vol. 23, n° 1, 2007, p. 32-39.

Durst K., Backes B., Goken M., "Indentation size effect in metallic materials: Correcting for the size of the plastic zone", *Scripta Materialia*, vol. 52, n° 11, 2005, p. 1093-1097.

Feng G., Nix W.D., "Indentation size effect in MgO", *Scripta Materialia*, vol. 51, n° 6, 2004, p. 599-603.

Huang Y., Zhang F., Hwang K.C., Nix W.D., Pharr G.M., Feng G., "A model of size effects in nano-indentation", *J. Mech. Phys. Sol.*, vol. 54, n° 8, 2006, p. 1668-1686.

Lou J., Shrotriya P., Allameh S., Buchheit T., Soboyejo W.O., "Strain gradient plasticity length scale parameters for LIGA Ni MEMs thin films", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 441, n° 1-2, 2006, p. 299-307.

Ma Q., D.R. Clarke D.R., "Size Dependence of the Hardness of Silver Single Crystals", *J. Mater. Res.*, vol. 10, n° 4, 1995, p. 853-863.

Nix W.D., Gao H., "Indentation size effects in crystalline materials: A law for strain gradient plasticity", *J. Mech. Phys. Sol.*, vol. 46, n° 3, 1998, p. 411-425.

Qin J., Huang Y., Hwang K.C., Song J., Pharr G.M., "The effect of indenter angle on the microindentation hardness", *Acta Materialia*, vol. 55, n° 18, 2007, p. 6127-6132.

Zong Z., Lou L., Adewoye O.O., Elmustafa A.A., Hammad F., Soboyejo W.O., "Indentation size effects in the nano- and micro-hardness of fcc single crystal metals", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 434, n° 1-2, 2006, p. 178-187.

Néphélomètre polaire à double polarisation : incertitude et validation des mesures

Christophe Verhaege*, Pascal Personne*, Valery Shcherbakov, Jean-François Gayet***,**

**IUT de Montluçon –Laboratoire de Météorologie Physique
Département Génie Thermique et Energie
Avenue A. Briand - BP 2235
03101 Montluçon CEDEX*

*** même adresse, Département Génie Mécanique et Productique*

****LaMP, 24 Avenue des Landais, 63 177 Aubière CEDEX*

verhaege@moniut.univ-bpclermont.fr

Section de rattachement : 37

Secteur : Secondaire

RESUME :

L'interaction particules-rayonnement est due à l'absorption et à la diffusion de la lumière par ces particules. Dans le cas de l'atmosphère, ce phénomène est important à quantifier pour d'une part évaluer le réchauffement de la Terre et pour d'autre part en déduire la qualité de l'air. Afin de mesurer la diffusion de la lumière par les particules nuageuses et les aérosols, un appareil a été conçu et réalisé à l'IUT de Montluçon. Cet appareil est un dispositif de laboratoire mesurant la lumière diffusée suivant 2 directions de polarisation perpendiculaires entre elles. En effet dans certaines directions, la lumière diffusée est polarisée même si le faisceau incident ne l'est pas. Dans cet article, les principales sources d'erreurs de mesures sont analysées. Puis la validation de nos mesures a été effectuée dans une chambre à nuage. Différents appareils (un autre néphélomètre et un granulomètre) avaient été utilisés au cours de ces essais. Dans le cas des mesures faites avec les deux néphélomètres l'accord est tout à fait satisfaisant. La granulométrie des gouttes d'eau déduite de nos mesures correspond bien à celle directement obtenue avec le granulomètre. Le degré de polarisation mesuré par l'appareil et celui recalculé à partir du spectre des gouttes présentent un accord raisonnable compte tenu de l'incertitude sur ce paramètre. Ces résultats valident nos mesures et les procédures de traitement.

MOTS-CLÉS : *mesure, aérosols, diffusion de la lumière, polarisation.*

1. Introduction

La connaissance des propriétés optiques des aérosols est d'une grande importance pour modéliser le bilan énergétique de la Terre et la télédétection de ces particules. Ces propriétés varient grandement suivant la nature des particules, suivant leur taille et suivant leur origine géographique (Dubovik et al., 2002). Le dernier rapport du GIEC (2007) a bien souligné la grande imprécision du calcul du réchauffement de la Terre liée à notre méconnaissance actuelle des effets directs et indirects des aérosols présents dans l'atmosphère. Pour analyser leurs propriétés optiques, il existe plusieurs types de néphélomètres. Certains mesurent l'énergie totale diffusée en intégrant cette énergie sur une grande étendue angulaire (de 7° à 170° pour le modèle 3563 de TSI) et cela pour plusieurs longueurs d'onde. D'autres mesurent séparément la diffusion avant et arrière. Les néphélomètre polaires (Gayet et al., 1997, 1998) mesurent l'énergie diffusée par une population de particules en fonction de l'angle θ . Estimer correctement la précision de ces mesures est d'une grande importance non seulement pour connaître la fonction de diffusion de chaque type de particule mais aussi pour déduire leur propriété microphysique (granulométrie) (Dubovik et al., 2006).

Le but de cette étude est de quantifier les erreurs des données issues de notre appareil et de valider dans le cas de gouttes sphériques homogènes nos mesures. Une rapide description de l'appareil sera d'abord faite puis les principales relations seront données. Avec celles-ci une analyse d'erreurs sera décrite. Enfin les résultats de la validation seront abordés dans la dernière partie.

2. Le néphélomètre polaire à double polarisation (D2PN).

Cet appareil (D2PN : Dual-Polarization Polar Nephelometer) a été présenté au CNRIUT de 2008 (Verhaege et al., 2008b).

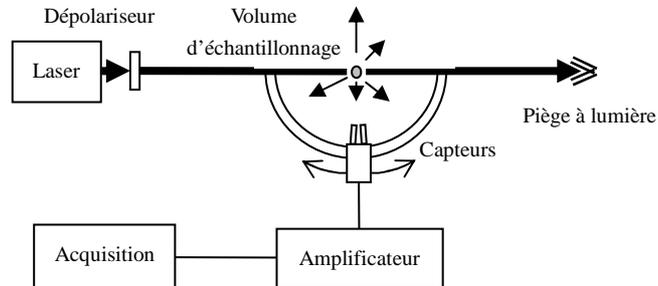


Figure 1 : Schéma de principe du néphélomètre polaire à double polarisation. Le flux de particules est perpendiculaire au plan du schéma.

Une des caractéristiques du phénomène de diffusion de la lumière est que même si la lumière incidente n'est pas polarisée, la lumière diffusée peut l'être, surtout en diffusion latérale et arrière.

C'est pour utiliser cette propriété que ce néphélomètre de laboratoire a été réalisé. Le DAO et la CAO ont été effectués sur CATIA au département GMP de l'IUT.

La Figure 1 rappelle le schéma de principe de cette sonde. Un faisceau laser, issu d'une diode laser multimode de forte puissance (1 W et de longueur d'onde 800 nm) intercepte perpendiculairement le flux de particules. L'intersection de ces deux cylindres de 10 mm de diamètre forme un volume d'échantillonnage d'environ $0,67 \text{ cm}^3$. La lumière diffusée est mesurée directement sans miroir à l'aide de 2 photodiodes à avalanche identiques montées sur un bras de 15 cm de longueur entraîné par un moteur pas à pas afin de tourner autour du volume d'échantillonnage. Le diamètre de la surface sensible des capteurs est 0,5 mm.

Compte tenu de la longueur du bras, l'angle solide vaut environ $9 \mu\text{sr}$. Leur sensibilité est d'environ 10^5 V/W sur une étendue de mesure comprise entre 2 pW et $2 \mu\text{W}$. Devant chacune des photodiodes, un polariseur est monté parallèlement et perpendiculairement au plan d'observation. Les deux capteurs forment avec le centre du volume d'échantillonnage un angle de 9° . Les deux quantités $I_{\parallel}(\theta)$ et $I_{\perp}(\theta) [\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}]$ sont mesurées tous les degrés entre 10° et 160° pour le premier capteur et entre 19° et 169° pour le deuxième. Cela est réalisé en 7,6 s.

L'ensemble est monté sur une table et fermé par un capot absorbant (figure 2). L'acquisition, le pilotage du moteur ainsi que le réglage des gains des amplificateurs programmables sont effectués à l'aide du logiciel LABVIEW.

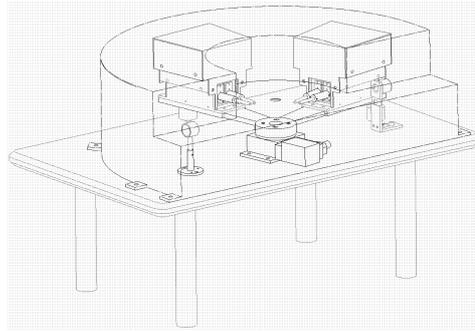


Figure 2 : Vue éclatée du néphélomètre. Le bras tournant a été représenté dans 2 positions.

La relation entre les intensités I mesurées et les tensions U en sortie des capteurs est donnée par la relation suivante :

$$I_{//,\perp}(\theta) = \frac{U_{//,\perp}(\theta) \cdot S}{k_s \cdot P \cdot \Omega_d \cdot V} = q \cdot U_{//,\perp}(\theta) \quad [1]$$

Où S est la surface du laser, k_s la sensibilité du capteur, P la puissance du laser, Ω_d l'angle solide du détecteur et V le volume d'échantillonnage. q est le coefficient de conversion ($q = 13,5 \text{ V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$). La diffusion totale $I(\theta)$ ainsi que le degré de polarisation $p(\theta)$ peuvent être connus de 19° jusqu'à 160° à l'aide des formules suivantes :

$$I(\theta) = I_{//}(\theta) + I_{\perp}(\theta) \quad [2]$$

et

$$p(\theta) = \frac{I_{//}(\theta) - I_{\perp}(\theta)}{I_{//}(\theta) + I_{\perp}(\theta)} \quad [3]$$

3. Exemples de mesures

Cet appareil est capable de mesurer tous types de particules de forme quelconque, sphérique ou autre. Dans le cas de particules non sphériques (suie et pollen) les figures 3 et 4 mettent en évidence les signatures très différentes de la dépolarisation de la lumière en diffusion latérale et arrière. Grâce à ces signatures,

les différentes particules peuvent être identifiées. Il est donc nécessaire d'avoir les mesures les plus précises possibles.

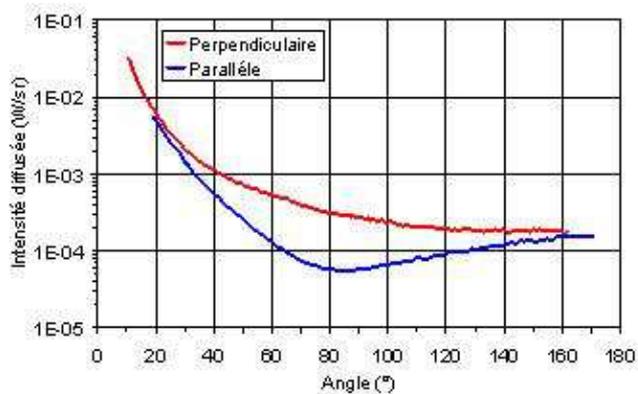


Figure 3 : Indicatrices de diffusion mesurées suivant 2 directions de polarisation orthogonales entre elles pour des particules de suie de carbone.

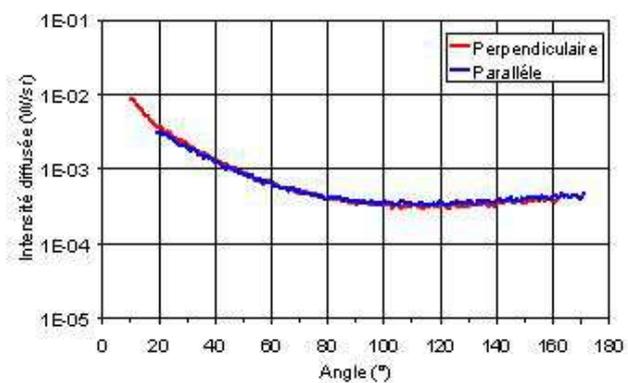


Figure 4 : Même représentation que pour la figure 3 mais pour du lycopode. La lumière diffusée par ce pollen n'est pas polarisée.

4. Analyse des erreurs de mesure

Ce type de mesure est entaché principalement de quatre sources d'erreur qui sont : (i) l'angle α , (ii) la valeur du coefficient de conversion q , (iii) le bruit électronique et (iv) les fluctuations de la concentration des particules analysées.

4.1. Incertitude angulaire

D'après le constructeur du moteur pas à pas, l'incertitude sur l'angle α est de $0,001^\circ$. De ce fait l'incertitude sur la position angulaire concerne essentiellement la valeur initiale de cet angle. Elle peut être chiffrée à environ $0,1^\circ$, de sorte que la fonction de diffusion mesurée peut être décalée sur l'abscisse de $\pm 0,1^\circ$.

4.2. Incertitude sur le coefficient de conversion

Compte tenu de l'équation [1], l'incertitude relative sur le coefficient de conversion q est donnée par la formule suivante :

$$\frac{\delta q}{q} = \sqrt{\left(\frac{\delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\delta k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\delta P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Omega_d}{\Omega_d}\right)^2 + \left(\frac{\delta \mathcal{V}}{\mathcal{V}}\right)^2} \quad [4]$$

Cette incertitude relative a pu être chiffrée à 6%. Il est à noter que cette incertitude affecte l'ensemble des mesures d'une même quantité. Cette imprécision concernera la position suivant l'axe des ordonnées de la fonction de diffusion et par conséquent la concentration des particules déduite de nos mesures.

4.3. Incertitude due au bruit électronique

Le bruit électronique est dû au bruit de la photodiode et au bruit de l'amplificateur. En condition d'obscurité totale, avec un gain de l'amplificateur de 1000 (figure 5), ce bruit mesuré représente une valeur de 12 mV crête à crête soit une erreur en sortie de chaque capteur comprise entre $\pm 6\mu\text{V}$. L'intensité diffusée et la tension associée présentent un minimum en diffusion latérale ($80^\circ \leq \alpha \leq 130^\circ$). Pour ces positions, lorsque le rapport signal sur bruit est supérieur à 5, les données sont considérées comme étant acceptables.

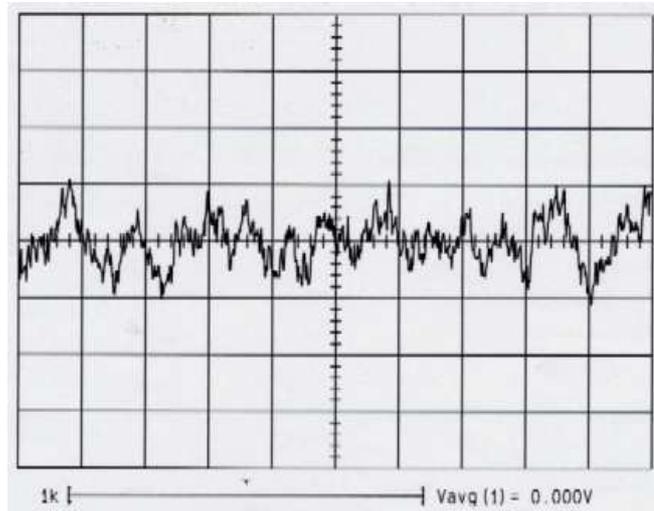


Figure 5 : Tension de sortie d'un capteur sans la composante continue (gain 1000 - calibres 5mV/div et 1ms/div).

4.4. Incertitude due aux fluctuations de concentration

Les mesures pour les 151 angles se font en 7,6 secondes. Durant cette période, la concentration des particules analysées n'est pas constante. Ces fluctuations de la concentration sont fonction de la qualité du générateur de particules.

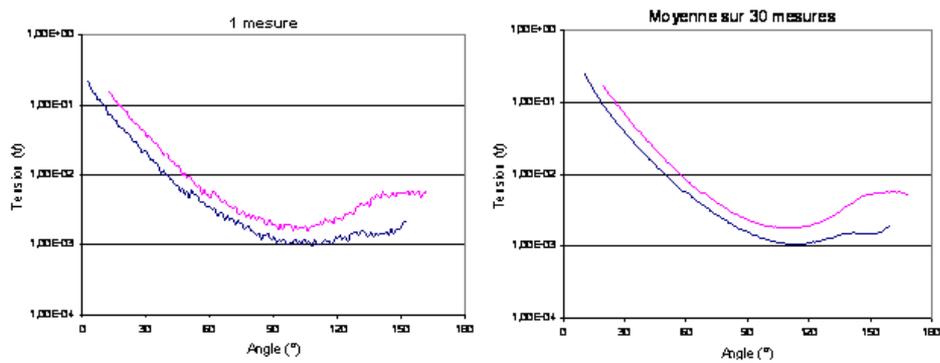


Figure 6 : Mesure des indicatrices de diffusion pour une mesure (1 aller à gauche) et pour 30 mesures (15 allers-retours à droite). Les deux courbes ont été volontairement écartées.

Ceci entraîne des oscillations de la fonction de diffusion (figure 6). Afin de lisser cette courbe, les données sont moyennées sur N mesures pour chaque angle.

$$\bar{I}_{//,\perp}(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_{//,\perp}(\theta) \quad [5]$$

L'incertitude sur $I_{//,\perp}$ est assimilée à l'écart type de la moyenne (ISO/IEC 2007) :

$$\sigma_{//,\perp}(\theta) = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N [I_{//,\perp}(\theta) - \bar{I}_{//,\perp}(\theta)]^2} \quad [6]$$

A l'aide des données recueillies, l'incertitude relative due aux fluctuations de la concentration représente moins de 5% pour N supérieur ou égal à 4. En conséquence nos mesures sont toujours moyennées sur 6 réalisations.

4.5. Incertitude sur le degré de polarisation

L'incertitude sur le degré de polarisation p ne dépend que des bruits électroniques et de concentration. En supposant que les erreurs sont indépendantes entre elles, l'équation [3] permet d'écrire l'équation de l'incertitude absolue sur le degré de polarisation :

$$\delta p(\theta) = \sqrt{\left(\frac{\partial p(\theta)}{\partial I_{\perp}} \cdot \delta I_{\perp}(\theta) \right)^2 + \left(\frac{\partial p(\theta)}{\partial I_{//}} \cdot \delta I_{//}(\theta) \right)^2} \quad [7]$$

On en déduit :

$$\delta p(\theta) = 2 \sqrt{\left(\frac{I_{//}(\theta)}{I(\theta)} \right)^2 \left(\frac{\delta I_{\perp}(\theta)}{I(\theta)} \right)^2 + \left(\frac{I_{\perp}(\theta)}{I(\theta)} \right)^2 \left(\frac{\delta I_{//}(\theta)}{I(\theta)} \right)^2} \quad [8]$$

L'incertitude absolue est utilisée car le degré de polarisation peut prendre la valeur zéro pour certains angles. Avec les équations [2] et [3] le terme p peut s'écrire :

$$\delta p(\theta) = \sqrt{[1-p(\theta)]^2 \left(\frac{\delta I_{\perp}(\theta)}{I(\theta)} \right)^2 + [1+p(\theta)]^2 \left(\frac{\delta I_{//}(\theta)}{I(\theta)} \right)^2} \quad [9]$$

Il apparaît que p dépend du degré de polarisation et de l'incertitude relative sur les quantités $I_{//,\perp}$. Comme il a été dit précédemment, en supposant $I_{//,\perp}$ inférieur à 5%, l'incertitude absolue δp vaut environ 0,1.

5. Validation des mesures du D2PN

Bien que le D2PN soit conçu pour mesurer les propriétés de diffusion de tout type de particules, quelle que soit leur forme, la validation des données a été faite dans le cas de gouttes d'eau sphériques et homogènes. Pour ces particules, les caractéristiques optiques peuvent être calculées en utilisant la théorie de Mie (1908) (Bohren et Huffman, 1983). De plus les granulomètres sont souvent calibrés avec des gouttelettes d'eau.

Cette validation des données du D2PN a été faite dans une chambre à nuage dans laquelle se trouvaient également un autre néphélomètre polaire (PN) et un granulomètre. Le néphélomètre polaire est un appareil destiné à être monté sur avion. Son principe, sa description ainsi que ses performances ont déjà fait l'objet de plusieurs publications (Gayet et al., 1997, 2004) et ont été aussi présentés au CNRIUT de 2008 (Verhaege et al., 2008b). Le DAO et la CAO ont été réalisés sur CATIA au département GMP de l'IUT. Cet appareil mesure la diffusion totale $I(\theta)$ dans 40 directions. Le granulomètre est le FSSP-100 de Particle Measuring Systems (PMS). Le nombre de goutte de rayon compris entre 1 et 16 μm est donné dans 15 classes de largeur 1 μm . Cette mesure est faite en recueillant l'intensité diffusée totale entre 4° et 12°. Les trois appareils avaient été placés à la même hauteur et le plus près possible les uns des autres.

Le brouillard est généré avec des rampes d'injecteurs pendant environ 20 minutes. Puis l'alimentation en eau était stoppée et la dissipation du brouillard durait environ 25 minutes. C'est au début de cette seconde phase que les mesures étaient réalisées.

Un exemple de la fonction de diffusion non normalisée $k^2 I(\theta)$, où $k = 2\pi/\lambda$ est le nombre d'onde, est représenté sur la figure 7(a) par des points gris pour le D2PN et noirs pour le PN. Les deux fonctions de diffusion présentent un très bon accord entre elles. Les petites différences observées peuvent être dues à l'hétérogénéité du brouillard.

Dans une deuxième étape, la fonction de diffusion du D2PN a été utilisée pour retrouver l'indice de réfraction complexe et la granulométrie (nombre en fonction de la taille) des particules sphériques. La méthode d'inversion a été décrite par Verhaege et al. (2008 a, b et 2009). Cette méthode associe une table de recherche pour l'indice de réfraction, à une méthode d'inversion pour la granulométrie.

La valeur trouvée de l'indice réel est 1,33 contre 1,329 généralement admise pour l'eau. Sur la figure 8, les distributions du nombre de gouttes sont comparées. Sur cette figure aussi on constate un bon accord entre les deux courbes. Il semble néanmoins que le FSSP-100 sous-estime le nombre de gouttes dans les deux premières classes. Ce fait n'est pas surprenant car il a déjà été constaté par Baumgardner et al. (2001) et incriminé à des problèmes d'alignement et d'optique sale.

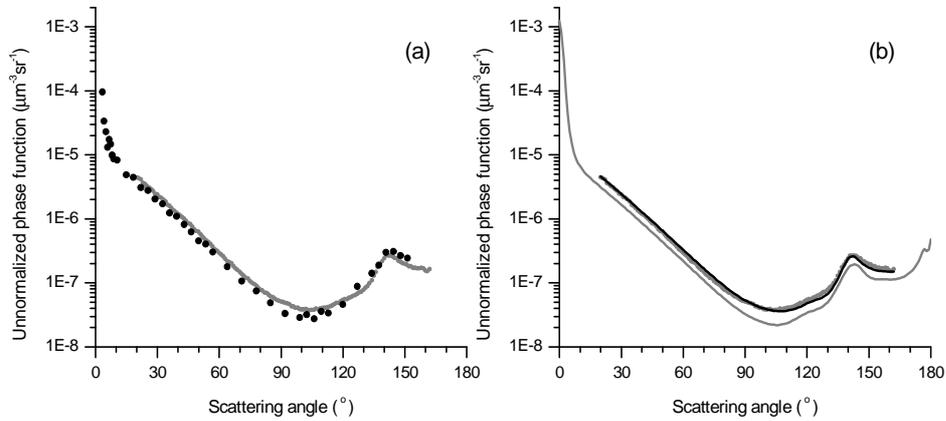


Figure 7 : Fonctions de diffusion non normalisées : (a) les points gris correspondent aux mesures du D2PN, les points noirs à celles du PN ; (b) les points gris correspondent toujours aux mesures du D2PN tandis que les courbes en trait noir et gris représentent les fonctions de diffusion calculées à partir du spectre dimensionnel des gouttes respectivement restitué et mesuré.

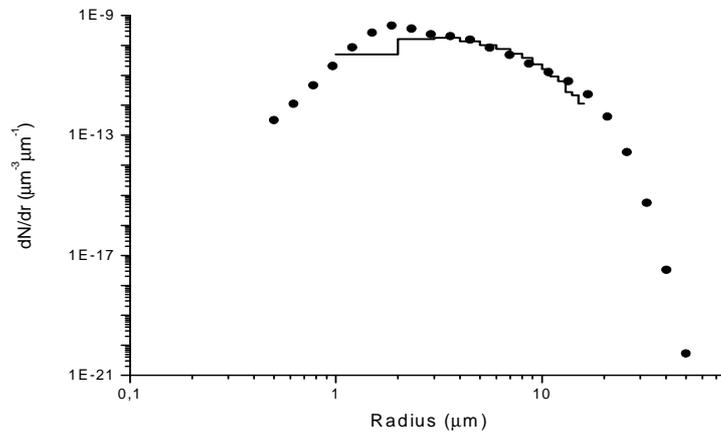


Figure 8 : Distribution en nombre des gouttes : les points représentent la distribution restituée à partir des mesures du D2PN, le trait continu est la distribution mesurée par le FSSP-100 de PMS.

Les fonctions de diffusion calculées à partir des distributions de gouttes respectivement restituée (points de la figure 8) et mesurée (trait continu de la figure 8) sont aussi représentées en trait noir et gris sur la figure 7(b). Ces courbes sont similaires en forme mais sont décalées en hauteur. Ceci s'explique du fait que le FSSP-100 tronque le spectre des gouttes car il ne peut pas détecter les gouttes de rayon supérieur à $16\ \mu\text{m}$.

Concernant le degré de polarisation, la figure 9 compare celui mesuré (points noirs) avec celui calculé (courbe en trait continu) à partir du spectre dimensionnel des gouttes restitué (points noirs de la figure 8). Le maximum à 142° est parfaitement restitué tandis que les différences observées pour les angles compris entre 80 et 130° sont cohérentes avec l'estimation de l'incertitude faite au paragraphe 3.

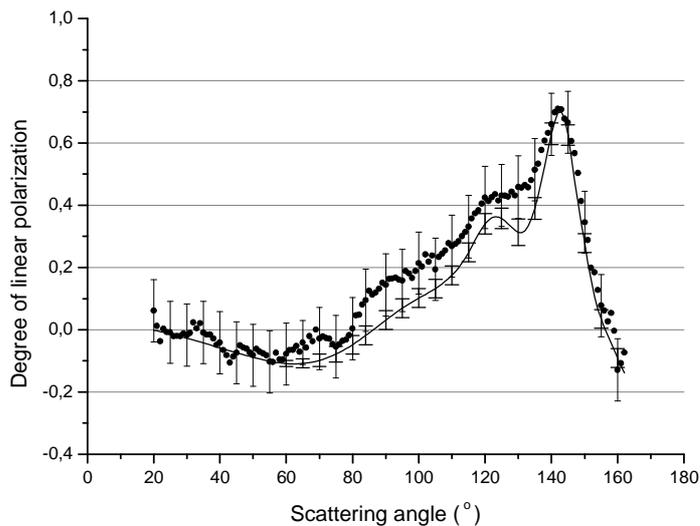


Figure 9 : Degré de polarisation mesuré avec le D2PN (points noirs) et calculé (courbe en trait continu) à partir de la distribution en nombre restituée. Les barres d'erreur avec les petits traits horizontaux correspondent aux incertitudes de mesures et celles avec les larges traits horizontaux correspondent aux incertitudes de restitution.

Conclusion

Le néphélomètre polaire à double polarisation mesure la diffusion de la lumière en fonction de l'angle de façon quasi continue entre 10 et 169° et cela suivant deux directions de polarisations perpendiculaires entre elles. L'étude a permis de mettre en évidence que l'incertitude principale est liée aux fluctuations de la concentration des particules. Cette incertitude pourra être diminuée en ajoutant un capteur témoin fixe qui permettra de corriger les variations de concentration. L'étude effectuée dans le cas de gouttes sphériques homogènes et en appliquant la théorie de Mie a mis en évidence la validité des mesures du D2PN. Grâce à cet appareil, l'étude de la diffusion de la lumière par des particules de forme irrégulière pourra être faite afin de confronter nos mesures avec différentes théories (Glassner, 1989, Dubovik et al., 2006, ...).

Bibliographie

Baumgardner D., H. Jonsson, W. Dawson, D. O'Connor, and R. Newton, "The cloud, aerosol and precipitation spectrometer: a new instrument for cloud investigations," *Atmospheric Research*, 59–60, 251–264 (2001).

Bohren C. F. and D. R. Huffman, *Absorption and scattering of light by small particles*, (3rd edition, Wiley-Interscience, 1983).

Dubovik O., B. N. Holben, T. F. Eck, A. Smirnov, Y. J. Kaufman, M. D. King, D. Tanré, and I. Slutsker, "Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations," *J. Atmos. Sci.* 59, 590-608 (2002).

Dubovik O., A. Sinyuk, T. Lapyonok, B. N. Holben, M. Mishchenko, P. Yang, T. F. Eck, H. Volten, O. Muñoz, B. Veihelmann, W. J. van der Zande, J.-F. Leon, M. Sorokin, and I. Slutsker, "Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust," *J. Geophys. Res.* 111, D11208 (2006).

Gayet J.-F., O. Crépel, J.-F. Fournol, and S. Oshchepkov, "A new airborne polar Nephelometer for the measurements of optical and microphysical cloud properties. Part I: Theoretical design," *Ann. Geophysicae* 15, No. 4, 451-459 (1997).

Gayet J.-F., F. Auriol, S. L. Oshchepkov, F. Schröder, C. Duroure, G. Febvre, J.-F. Fournol, O. Crépel, P. Personne, and D. Dageron, "In situ measurements of the scattering phase function of stratocumulus, contrails and cirrus," *Geophysical Research Letters* 25, 971–974 (1998).

Gayet J.-F., J. Ovarlez, V. Shcherbakov, J. Ström, U. Schumann, A. Minikin, F. Auriol, A. Petzold, and M. Monier, "Cirrus cloud microphysical and optical properties at southern and northern midlatitudes during the INCA experiment," *J. Geophys. Res.* 109, D20206, doi:10.1029/2004JD004803 (2004).

Glassner A.S., « *An Introduction to ray tracing* », Academic press, 1989, 327 p.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), "Climate Change 2007: The Physical Science Basis," Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC, ISBN 978 0521 88009-1 Hardback, (2007).

ISO/IEC Guide 99:2007, International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM), (2007).

Mie G., « Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen », *Ann. Phys. Leipzig*, vol. 25, 1908, p. 377–445.

Verhaege C., P. Personne, V. Shcherbakov « Validation d'une méthode de restitution de l'indice de réfraction d'un ensemble de particules sphériques à partir d'une mesure de la lumière diffusée », *14^{ème} CNRIUT*, Villeurbanne, 2008.

Verhaege C., P. Personne, V. Shcherbakov « Appareils de mesure pour la recherche environnementale », *14^{ème} CNRIUT*, Villeurbanne, 2008.

Verhaege C., V. Shcherbakov, and P. Personne, "Limitations on retrieval of complex refractive index of spherical particles from scattering measurements," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 109, 2338-2348 (2008).

Verhaege C., V. Shcherbakov, and P. Personne, "Retrieval of complex refractive index and size distribution of spherical particles from Dual-Polarization Polar Nephelometer data," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 110, 1690-1697 (2009).



Christophe Verhaege

Docteur en Physique de l'Atmosphère, Ingénieur ENSMA, DUT GTE.

Enseignant-chercheur à l'Université Blaise Pascal à l'IUT de Montluçon au Département GTE (Thermodynamique et Machines Thermiques) et au Laboratoire de Météorologie Physique UMR CNRS 6016.

Interaction rayonnement-particules : mesure des propriétés optiques des aérosols et développement de méthodes inverses pour la restitution des paramètres microphysiques des nuages et aérosols à partir de mesures optiques.

Pascal Personne

Docteur ès Sciences Physiques, Professeur des Universités, 37^{ème} section CNU (météorologie, océanographie physique et physique de l'environnement). Enseignant de l'Université Blaise Pascal à l'IUT de Montluçon au Département GTE (Mécanique des Fluides, Mesure-Métrologie et Machines Frigorifiques) et chercheur au Laboratoire de Météorologie Physique (LaMP) UMR CNRS 6016.



Spécialités : processus microphysiques de formation et de développement des nuages, interaction rayonnement-particules, givrage des aéronefs et des structures terrestres, prévision de la température de surface des routes.

Valery Shcherbakov

Ph. D. en Optique Physique. Professeur des universités, 37^{ème} section CNU – Météorologie, océanographie physique et physique de l'environnement. Enseignant-chercheur à l'Université Blaise Pascal (IUT de Montluçon - Dep^t GMP) et au Laboratoire de Météorologie Physique UMR CNRS 6016.



Spécialiste en synergie des méthodes statistiques et des problèmes inverses à l'étude des nuages et des aérosols.

Jean - Francois Gayet

Dr. es Sciences en Sciences fondamentales (Université Blaise Pascal).
Ingenieur de Recherche Hors Classe CNRS au Laboratoire de Meteorologie Physique UMR CNRS 6016.



Specialiste en Physique des nuages et des strategies d'observation multi-observationnelles in situ des nuages.

Conception et mise en forme de nouveaux matériaux à partir de macromolécules naturelles

Lucie Crépy, Patrick Martin, Nicolas Joly

*IUT de Béthune – Université d’Artois
Département Chimie
Unité de Catalyse et de Chimie du Solide, site de l’Artois – UMR CNRS
8181
1230, rue de l’Université-62408 Béthune Cedex
lucie_crepy1@ens.univ-artois.fr ; patrick.martin@univ-artois.fr ;
nicolas.joly@univ-artois.fr*

**Sections de rattachement : 32
Secteur : Secondaire**

RESUME : *L’idée de fabriquer des matériaux plastiques à partir de ressources végétales date des années 1930 mais le développement de ces matériaux a été mis en sommeil car les polymères d’origine fossile (issus de la pétrochimie), moins onéreux, se sont développés. Cependant, ces matériaux de synthèse constituent un problème pour l’environnement puisque leur durée de vie est supérieure à 400 ans. La présente étude concerne l’élaboration et la conception de matériaux biosourcés à partir de macromolécules naturelles d’origine végétale (cellulose, amidon, inuline, chitine, pectine...) et de chaînes grasses que l’on retrouve dans les constituants des huiles végétales. Les matériaux visés sont de nature diverse : plastiques, tensioactifs... Pour chaque nouveau matériau synthétisé, nous déterminons l’ensemble des propriétés à la fois chimiques, physico-chimiques, thermiques et mécaniques.*

MOTS-CLÉS : *polysaccharides, acides gras, estérification, éthérification, polymères biosourcés, plastiques, tensioactifs.*

Introduction

La préservation de l’environnement passe par la conservation des ressources fossiles, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et l’amélioration de la biodégradabilité des produits. Ce contexte a pour conséquence directe l’essor de l’utilisation des ressources renouvelables en substitution de celles d’origine

fossile (Pasty, 2004 ; Schaub, 2006). De plus, l'utilisation de ressources naturelles est motivée par leur grande abondance sur notre planète et leur caractère renouvelable ; c'est le cas par exemple de la cellulose, molécule organique naturelle la plus abondante sur terre, qui présente de ce fait un grand intérêt du point de vue industriel. Les macromolécules naturelles peuvent aussi présenter des structures et des originalités que la ressource pétrochimique est incapable de reproduire, comme les doubles liaisons contenues dans certaines huiles végétales (Arvalis, 2005). Par ailleurs, les difficultés à recycler nos déchets et la nécessité de valoriser les sous-produits agricoles sont également un atout pour le marché des polymères biosourcés.

Les plastiques d'esters cellulosiques

Les matières premières

La cellulose

La cellulose se situe dans la paroi des cellules végétales. C'est le principal constituant des végétaux, et en particulier de la paroi cellulaire, avec une teneur variant de 15 % à 99 % selon l'espèce végétale (Saka, 2000). Substance organique la plus abondante dans la nature, elle représente plus de 50 % de la biomasse, soit 90 milliards de tonnes par an synthétisés par les végétaux (Vandamme, 2002).

La cellulose est un homopolymère d'unités glucose (Figure 1) liées entre elles par des liaisons β 1((β 4) (Grignard, 2000). Le nombre d'unités, ou degré de polymérisation (DP), détermine la longueur des chaînes. Il varie avec l'origine végétale (Wilks, 2001).

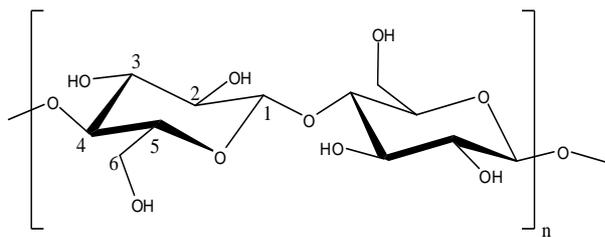


Figure 1 : Structure de la cellulose.

Les acides gras

Afin de déterminer les acides gras à greffer sur la cellulose, nous nous intéressons aux acides gras majoritaires des triglycérides des huiles végétales (Tableau 1).

Acides gras	Palmiste	Arachide	Olive	Soja	Tournesol	Lin	Ricin
Caprylique: C₈	4						
Caprique: C₁₀	3,5						
Laurique: C₁₂	47,7						
Myristique: C₁₄	16,1						
Palmitique: C₁₆	8	10,3	10,7	10,4	6,4	6	1,2
Stéarique: C₁₈	2,4	3,7	3,7	3,7	3,7	4	0,7
Oléique: C_{18:1}	15,7	56,6	76,2	21,1	23,8	22	3,2
Linoléique: C_{18:2}	2,4	21,1	6,8	57,7	65	16	3,4
Linoléinique: C_{18:3}			0,7	7,6	0,2	52	0,2
Arachidique: C₂₀		1,7	0,4	0,3	0,2		0,3

Tableau 1. Composition moyenne en acides gras des triglycérides d'huiles végétales

Nous choisissons des acides gras saturés de longueur de chaîne comprise entre 12 et 18 atomes de carbone (de l'acide laurique à l'acide stéarique), ainsi qu'un acide gras monoinsaturé à 18 carbones : l'acide oléique. Lors des synthèses, nous utilisons ces acides gras sous formes de chlorures d'acides car ces derniers sont plus réactifs.

Synthèse d'esters celluloses

Les esters de cellulose connaissent un large succès depuis de nombreuses années, puisqu'ils représentent une classe commercialement importante. Récemment, les esters organiques de cellulose ont suscité un grand intérêt, dû en partie à leur base renouvelable et leur faible toxicité.

Lors de ces travaux, nous essayons d'obtenir des films plastiques par greffage d'acides gras sur la cellulose en utilisant une méthode simple d'estérification (Figure 2). Pour cela, nous utilisons des chlorures d'acides gras saturés avec un nombre de carbone variant de 12 à 18 ou un chlorure d'acide gras monoinsaturé, et de la cellulose en solution (Joly *et coll.*, 2005). Il faut souligner que la cellulose est insoluble en solvants organiques classiques et dans l'eau, de

plus elle ne présente pas de phénomène de fusion. Il faut donc utiliser un système de solvant particulier : chlorure de lithium / *N,N*-diméthylacétamide (LiCl / DMAc), afin de dissoudre la cellulose. La synthèse a ainsi lieu en milieu homogène. Cette réaction se déroule également en présence d'un catalyseur basique, le *N,N*-diméthyl-4-aminopyridine (DMAP), qui a pour rôle d'augmenter la vitesse de la réaction.

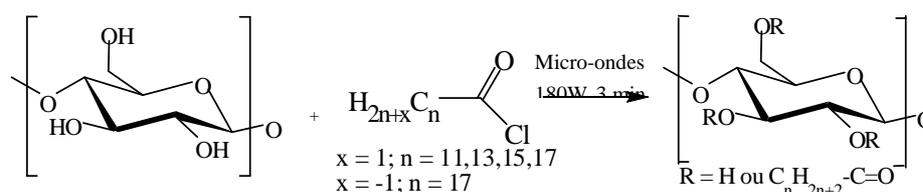


Figure 2 : Estérification de la cellulose par un chlorure d'acide.

Au cours de ces synthèses, nous utilisons l'irradiation micro-ondes. Le rayonnement micro-ondes est une méthode d'activation des réactions chimiques permettant notamment de diminuer fortement les temps de réaction par rapport à une activation par chauffage classique, tout en obtenant les mêmes résultats de synthèse (Satgé *et coll.*, 2002). Dans notre cas, le temps de réaction est fixé à 3 minutes, contre 3 heures lors d'un chauffage classique (réduction de 60 %). Ces raisons font du rayonnement micro-ondes une méthode prometteuse dans le domaine de la chimie propre. Pour ces synthèses, nous utilisons un four à micro-ondes domestique (four multimode) de puissance moyenne réglée à 180W.

Les produits obtenus en fin de synthèse sont récupérés par précipitation et purifiés par un système de dissolution / précipitation multiple. Enfin, pour convertir nos produits en films plastiques, nous suivons une méthode de mise en forme appelée « casting ». Cette méthode consiste à dissoudre un produit dans un minimum de solvant volatil, verser cette solution dans un récipient, puis laisser le solvant s'évaporer à température ambiante et pression atmosphérique. Nous obtenons alors un film plastique d'ester cellulosique souple et translucide.

Résultats

Les produits synthétisés (Crépy *et coll.*, 2009) sont tous caractérisés comme esters cellulosiques purs grâce aux analyses Infrarouges (IR) (Figure 3). Ces analyses confirment l'estérification de la cellulose par les acides gras quelque soit leur longueur de chaîne ou leur équivalent, et la pureté des produits obtenus. Nous retrouvons les pics caractéristiques de la cellulose (3400cm^{-1}), de la fonction ester (1740cm^{-1}), de la chaîne grasse (720cm^{-1}), et de l'insaturation dans le cas de l'oléate de cellulose (3010cm^{-1}).

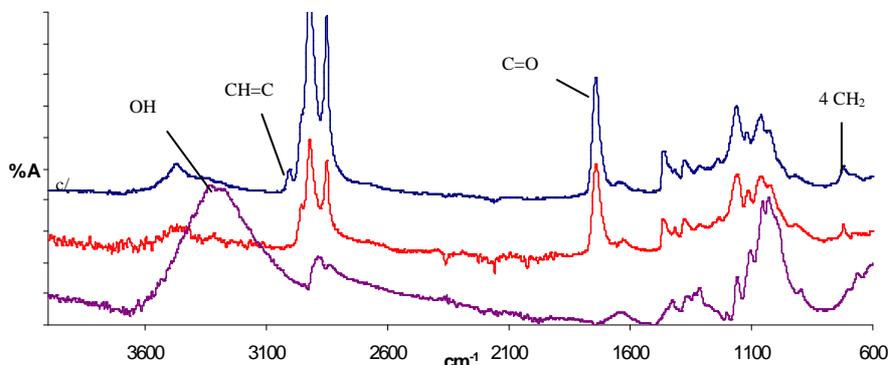


Figure 3 : Spectres IR : a/ cellulose, b/ laurate de cellulose, c/ oléate de cellulose.

Pour chaque ester cellulosique synthétisé (Tableau 2), nous effectuons des calculs de gain massique (poids du produit final / poids sec de cellulose introduite). Les valeurs de gains massiques augmentent avec le nombre d'équivalents en chlorures d'acide gras, ce qui traduit l'augmentation du taux de greffage de chaînes grasses sur la cellulose.

Des valeurs de degré de substitution (DS) sont également calculées à l'aide de la spectroscopie RMN-¹H en faisant le rapport des intégrations de certains pics. Le DS correspond au nombre de chaînes grasses greffées par unité glucidiques. Ses valeurs sont comprises entre 1,7 et 3 (valeur maximale). Les esters cellulosiques ayant un DS inférieur à 1,7 n'ont pas pu être convertis en films plastiques par casting, car ils sont insolubles en solvants organiques. Le calcul de DS n'a également pas pu être réalisé.

Chaînes Grasses	Equivalent en chlorures d'acide gras	2	3	4	5	6	7	8	9
Laurate (12:0)	Gain massique (%)	45	55	67	177	230	240	273	277
	DS	-	-	-	1,7	2,2	2,4	2,6	2,7
Myristate (14:0)	Gain massique (%)	0	170	223	164	238	245	226	262
	DS	-	-	-	2,0	2,1	2,7	2,8	2,7
Palmitate (16:0)	Gain massique (%)	667	0	117	156	245	259	289	302
	DS	-	-	-	2,2	2,6	2,8	2,7	2,9
Stéarate (18:0)	Gain massique (%)	218	174	247	239	316	259	301	345
	DS	-	-	1,9	2,4	2,3	2,9	3,0	3,0
Oléate (18:1_{9Z})	Gain massique (%)	142	143	288	335	370	380	387	333
	DS	-	-	2,4	2,6	2,9	2,9	3,0	3,0

Tableau 2. Estérification de la cellulose par différents chlorures d'acides

L'obtention de ces films plastiques d'esters cellulosiques avec des greffons de longueur, nature et DS variables permettent d'étudier les propriétés mécaniques et hydrophobiques de toute une gamme de matériaux biosourcés. Pour cela, nous effectuons des tests de traction uniaxiale qui nous renseignent sur les valeurs de contrainte, d'élongation à la rupture, et du module de Young (Figure 4).

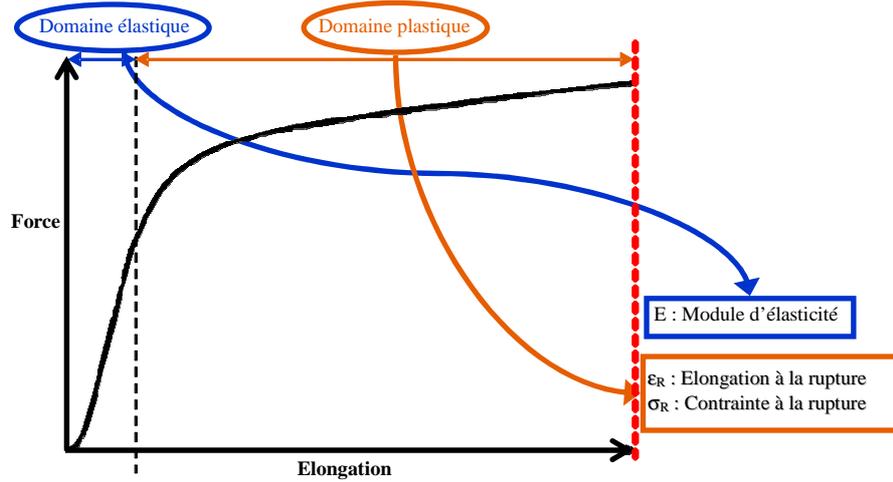


Figure 4 : Courbe dynamométrique obtenue par test de traction.

Pour l'hydrophobicité, nous mesurons les angles de contact entre une goutte d'eau et la surface d'un film plastique (Figure 5). Un matériau est dit hydrophobe si l'angle de contact entre la goutte d'eau et le substrat mesure au moins 90° (Brevet Saint-Gobain Vitrage, 1999).

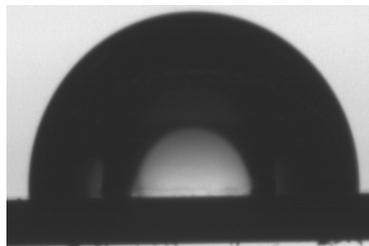


Figure 5 : Observation d'une goutte d'eau sur un film plastique de laurate de cellulose.

Le tableau 3 regroupe les valeurs des propriétés mécaniques et hydrophobiques des films plastiques synthétisés, et de quelques plastiques pétrochimiques commerciaux. Nous constatons que les films cellulosiques ont des propriétés mécaniques qui rentrent dans la gamme des plastiques pétrochimiques de commodité, même si toutefois les valeurs d'élongation à la rupture restent bien inférieures pour nos matériaux biosourcés. Enfin, les plastiques cellulosiques synthétisés peuvent être qualifiés d'hydrophobes.

	Contrainte à la rupture (MPa)	Elongation à la rupture (%)	Module de Young (MPa)	Angle de contact (°)
Esters de cellulose C₁₂ à C₁₈ saturés	8 - 20	5 - 65	140 - 340	92 - 106
Oléate de cellulose	3 - 7	5 - 55	50 - 100	89 - 100
Polyéthylène Basse Densité	7 - 16	100 - 800	102 - 240	91
Polyéthylène Haute Densité (linéaire)	25 - 45	50 - 900	900 - 1200	89

Tableau 3. Comparaison des propriétés mécaniques et hydrophobiques de nos polymères cellulosiques avec des polymères pétrochimiques commerciaux

Des analyses thermomécaniques et Rayons X sont actuellement réalisées en collaboration avec Laboratoire de Structure et Propriété de l'Etat du Solide de Lille 1 (UMR CNRS 8008), afin de compléter l'ensemble des propriétés de ces matériaux.

Je tiens à remercier Oséo Innovation pour son soutien financier lors de ces travaux.

Les Tensioactifs

Nous cherchons également à synthétiser des tensioactifs dérivant de polysaccharides d'origine végétale : inuline, amidon, chitine... En effet, ces derniers présentent des structures chimiques et des propriétés physico-chimiques intéressantes, sans oublier des intérêts écologiques importants. A ces polymères d'origine renouvelable, nous greffons des chaînes grasses linéaires contenant 6 à 18 atomes de carbone, que l'on retrouve fréquemment dans les triglycérides des

huiles végétales (Figure 6). Des réactions simples d'estérification et d'éthérisation sont utilisées pour mener à bien la synthèse de tels composés (Durand, 2006). Ainsi, il est possible de comparer l'efficacité de ces tensioactifs biosourcés selon leur constitution et leur degré de substitution.

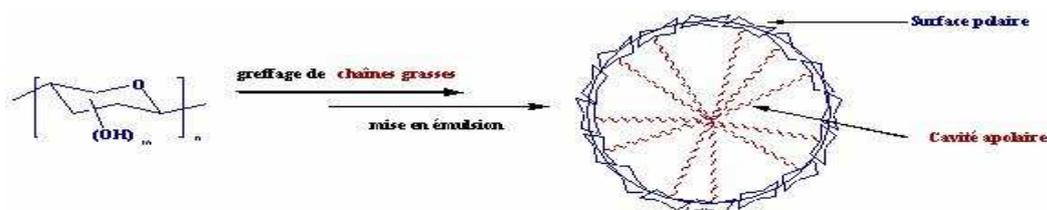


Figure 6 : Schéma général pour l'obtention de tensioactifs à partir de polysaccharides.

La nature amphiphile de ces polymères leur confère généralement des propriétés particulières en solution comme par exemple une tendance à l'auto-organisation pour former des agrégats et des micelles polymères, ou encore une tendance à accroître l'activité de surface. Ces caractéristiques rendent ces composés particulièrement attractifs dans de nombreux domaines allant de la détergence aux bétons, en passant par les industries des matières plastiques... sans oublier la libération contrôlée de principes actifs, en médecine et agriculture, qui est l'une des applications proposées les plus récentes (Brevet Ehrhardt *et coll.*, 1999 ; Stevens *et coll.*, 2001).

Bibliographie

ARVALIS, « *La révolution agro-industrielle attendue pour la société de demain* », Institut du Végétal, 23 novembre 2005.

Crépy L., Chaveriat L., Banoub J., Martin P., Joly N., « *Synthesis of cellulose fatty esters as plastics – Influence of the degree of substitution and the fatty chain length on mechanical properties* », ChemSusChem, vol. 2, 2009, p. 165-170.

Durand A., « *Synthesis of amphiphilic polysaccharides by micellar catalysis* », Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, vol. 256, 2006, p. 284-289.

Ehrhardt S., Alireza H.B., Kunz M., Scheiwe L., Brevet US n° 5,877,144, 1999.

Grignard J.L., *Biochimie végétale*, Paris, Editions Dunod, 2000.

Joly N., Granet R., Branland P., Verneuil B., Krausz P., « *New methods for acylation of pure and sawdust - extracted cellulose by fatty acid derivatives – thermal and mechanical analyses of cellulose-based plastic films* », *Journal of Applied Polymers Science*, vol. 97, 2005, p. 1266-1278.

Pasty J.C., « *Les débouchés non alimentaires des produits agricoles : un enjeu pour la France et l'U.E.* », Rapport du Ministère de l'Environnement français, 2004.

Saint-Gobain Vitrage, Brevet US WO9918168, Azzopardi M.J., Delattre L., Codazzi N., 1999.

Saka S., *Wood and cellulosic chemistry*, 2000, p. 51-81.

Schaub C., « *Chimie végétale: les promesses de l'or vert* », *Enjeux les Echos*, n° 224, mai 2006.

Satgé C., Verneuil B., Branland P., Granet R., Krausz P., Rozier P., Petit C., « *Rapid homogeneous esterification of cellulose induced by microwave irradiation* », *Carbohydrate Polymers*, vol. 49, 2002, p. 373-376.

Stevens C.V., Meriggi A., Booten K., « *Chemical modification of inulin, a valuable renewable resource, and its industrial applications* », *Biomacromolecules*, vol. 2, n° 1, 2001.

Vandamme E.J., De Baets S., *Biopolymer*, Weinheim, Editions Wiley-VCH, vol. 5, 2002.

Wilks E.S., *Industrial Polymers Handbook*, vol. 3, Editions Miley-VCH, 2001.



Patrick Martin est né à Abbeville (France) en 1963. Il a obtenu son doctorat à l'université de Picardie-Jules Verne en 1993 sous la direction du professeur P. Villa dans le domaine des matières premières et de la glycochimie. En 1994, il est devenu « Maître de Conférences » à l'université de Picardie-Jules Verne au « Laboratoire des glucides » où il a travaillé sur les glycomolécules amphiphiles avec le professeur P. Villa et sur la synthèse d'oligosaccharides avec le professeur G. Goethals. En 2000, il a obtenu son habilitation et a été promu professeur en 2001 à l'Université d'Artois (IUT Béthune) dans le Laboratoire de la Barrière Hémato-Encéphalique, où il a travaillé sur la vectorisation de médicaments avec les professeurs R. Cecchelli et E. Monflier. Depuis 2006, il travaille au Laboratoire de Physico-Chimie des Interfaces et Applications. Ses recherches sont principalement axées sur la chimie de produit naturel, la glycochimie (surfactants, cristaux liquides, vectorisation de médicaments) et les biomatériaux. Il est l'auteur de 45 publications scientifiques internationales, de 3 brevets, de 21 actes de congrès et de 83 présentations orales ou par affiche. Il poursuit actuellement ses activités de Recherche au sein de l'Unité de Catalyse et Chimie du Solide *site Artois* (UMR CNRS 8181) dont il dirige l'équipe Chimie à Base Végétale, et est en parallèle Directeur de l'IUT de Béthune.



Nicolas Joly est né à Limoges (France) en 1976. En 2003, il a obtenu son doctorat dans le domaine de la chimie appliquée - chimie des substances naturelles à l'Université de Limoges sous la direction du professeur Pierre Krausz. Son doctorat avait pour objet la valorisation de sous-produits agricoles et de sylviculture, particulièrement la synthèse et la caractérisation de nouveaux films plastiques obtenus par acylation et réticulation de la cellulose (Thèse). De 2004 à 2005, il est ATER (Attaché temporaire d'enseignement et de recherches) et rejoint le Laboratoire de la Barrière Hémato-Encéphalique (université d'Artois) sous la direction du professeur Roméo Cecchelli. Pendant ces 2 années, il a étudié la synthèse et la caractérisation des molécules hétérocycliques pour des applications thérapeutiques et il a également poursuivi ses activités sur la valorisation des sous-produits agricoles et de sylviculture par la synthèse de surfactants basés sur les oligo- et polysaccharides naturels. En 2006, il devient Maître de Conférences et rejoint l'équipe « chimie verte et environnement » du « L.P.C.I.A. » où il développe déjà des surfactants naturels. Il poursuit actuellement ses activités de Recherche au sein de l'Unité de Catalyse et Chimie du Solide *site Artois* (UMR CNRS 8181), sur le site de l'IUT de Béthune, et est en parallèle Chef du Département Chimie de l'IUT de Béthune.



Lucie Crépy est née à St Pol-sur-Mer (France) en 1983. Après l'obtention d'un DUT Chimie à l'IUT de Béthune en 2003, elle a obtenu un Master de Chimie Organique Macromoléculaire en 2007. Depuis 2007, elle réalise son doctorat intitulé *"Conception et propriétés de nouveaux matériaux à partir de macromolécules naturelles"* sous la direction du Professeur Patrick Martin et du Docteur Nicolas Joly, au sein de l'Unité de Catalyse et Chimie du Solide *site Artois* (UMR CNRS 8181), sur le site de l'IUT de Béthune (62). Parallèlement à ses activités de Recherche, elle occupe, depuis 2009, un poste d'ATER (Attaché temporaire d'enseignement et de recherches) au Département Chimie de l'IUT de Béthune.

Sondes capacitives intégrées aux bagues de roulements pour la mesure des efforts statiques et dynamiques

Patrick Marconnet, Bernard Pottier, Lanto Rasolofondraibe, Danielle Nuzillard

IUT de Reims-Chalôns-Charleville, Rue des Crayères, 51687 REIMS Cedex 2

lanto.rasolofondraibe@univ-reims.fr, patrick.marconnet@univ-reims.fr,

Sections de rattachement : 60 & 61

Secteur : Secondaire

RESUME : *Nous intégrons des sondes capacitives dans les bagues de roulements afin de réaliser des condensateurs à écartement variable. Ceux-ci traduisent en signal électrique les déformations des bagues provoquées par les efforts statiques et dynamiques que subissent les roulements. Comme ces derniers sont proches des pièces en mouvement, le signal obtenu est de très grande qualité. La forme des capteurs et leur faible encombrement permettent de les intégrer aisément lors de la conception de la machine. Les applications sont nombreuses : (i) sur les roues des véhicules automobiles, il permet d'optimiser les informations reçues par les dispositifs de sécurité intégrés, (ii) sur les engins de levage, il mesure la charge, (iii) il permet la surveillance des défauts des machines par analyse vibratoire.*

Ce travail a fait l'objet de deux dépôts de brevets à l'INPI sous les numéros n° 2 908 183 du 07-11-2006 et n° 07 04614 du 27-06-2007 avec extension PCT.

MOTS-CLES : *sondes capacitives – roulements – détection de défauts – mesures des efforts statiques – mesures des efforts dynamiques – analyse vibratoire – déformation*

1. Introduction

L'analyse vibratoire est l'outil le plus utilisé pour surveiller en permanence l'état des machines tournantes. Celle-ci consiste à exploiter le signal produit par les forces dynamiques d'origine mécanique engendrées par les pièces en mouvement. En particulier, sur un roulement, à chaque fois qu'une bille rentre en contact avec un écaillage d'une bague, cela engendre un choc périodique que l'on retrouve dans le signal vibratoire. L'amplitude des chocs dépend de la dimension du défaut. Sa lecture n'est pas toujours aisée car il y a un mélange de signaux et une perte d'information suivant l'éloignement du capteur. Afin d'améliorer la qualité du signal reçu, nous plaçons des capteurs directement dans

les bagues de roulements car ces derniers sont situés entre les parties mobiles et les parties fixes de la structure. Le capteur est constitué de sondes capacitives intégrées aux bagues. Il mesure la grandeur physique déplacement X_i . Ce dispositif permet aussi: (i) la mesure des déformations et des forces subies par les roulements de roues des véhicules automobiles afin de connaître les efforts au contact pneumatique/chaussée, (ii) la mesure d'efforts statiques sur les roulements des machines industrielles (exemple : ponts roulants, pesage, etc.)

2. Présentation et caractéristiques de la sonde capacitive

2.1 Pression de Hertz et principe de fonctionnement du capteur

La transmission des efforts mécaniques se fait par l'intermédiaire des surfaces de liaison entre les solides. Dans les roulements, les contacts étroits sont ponctuels (billes) ou linéiques (rouleaux) et la théorie de Hertz permet d'associer un modèle cohérent de pression de contact à ces surfaces. Il donne la répartition des contraintes et des déformations à l'intérieur du matériau de la bague avec les principales hypothèses suivantes :

- l'aire de contact est très petite devant les surfaces latérales des solides,
- les solides sont non-conformes, semi-infinis,
- il n'y a pas de frottement.

Pour un contact linéique, la répartition du champ de pression de contact est modélisée uniformément dans le sens de la longueur et selon une demi-ellipse dans le sens de la largeur comme indiqué sur la figure 1. Dans la pratique, les cylindres de roulement présentent des formes qui permettent de compenser les charges de bord et la longueur effective de contact est inférieure à la longueur du rouleau. La pression de Hertz correspond à la valeur maximale sur le grand axe de la demi-ellipse. Elle ne doit pas dépasser la pression admissible par le matériau ($p_{\max} \leq p_{\text{admissible}}$) avec $p_{\text{admissible}} = 4 \text{ GPa}$ pour un roulement à rouleaux, valeur prise par les fabricants de roulements.

On impose une charge uniformément répartie sur le demi-rouleau. Les contraintes et les déformations subies par les solides en contact sont alors exprimées analytiquement en fonction de la pression au contact et de l'aire de la surface de contact (HILL et al 1993). La figure 2 montre leur variation en fonction de la profondeur atteinte sous la zone de contact dans la bague de roulement. La contrainte normale principale σ_{zz} décroît rapidement en z .

Les évolutions des contraintes principales σ_{ii} le long de l'axe de symétrie (fig 2) ne sont pas identiques. Ces différences prise deux à deux donnent naissance à une contrainte tangentielle maximale τ_{ij} .

La zone la plus fortement sollicitée se trouve donc en sous-couche et dépend seulement de la géométrie du contact et du coefficient de Poisson des matériaux

des solides.

La contrainte de cisaillement passe par un maximum qui se situe entre $0,48a$ à $0,78b$ suivant la géométrie du contact.

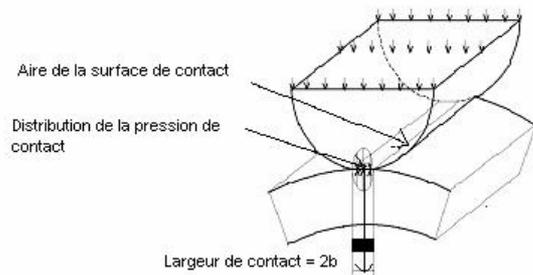


Figure 1 : Contact entre le rouleau et la bague de roulement.

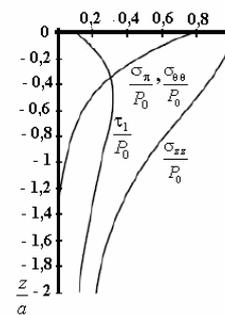


Figure 2 : variation des composantes du tenseur des contraintes le long de l'axe de symétrie.

Cette zone est le point de départ des fissures en sous couche qui apparaissent avec le phénomène de fatigue du matériau. Ainsi pour une bague de roulement à rouleaux de diamètre 60 mm , la demi largeur de contact b à la pression maxi de 4 GPa est de 0.35 mm , la zone sensible en sous couche se situe à 0.27 mm du contact. L'implantation du capteur évite cette zone. Les déformations dans la bague sont liées aux contraintes par une matrice de raideur et diminuent elles aussi rapidement avec la profondeur z . Nous exploitons ce gradient de la déformation dans l'épaisseur de la bague de roulement suivant une direction normale à la surface de contact des solides.

2.2 Caractéristiques de la sonde capacitive

Nous proposons la réalisation suivante (Fig. 5) qui pénalise peu la capacité du roulement. La concentration de contrainte est augmentée de l'ordre de 20%.

La bague est percée au diamètre de 0,5 mm. Le fond de perçage se trouve à $1,2b$ de la surface de contact avec le rouleau avant d'atteindre la zone du point de départ des fissures. Un rainurage ou un lamage est effectué sur la bague.

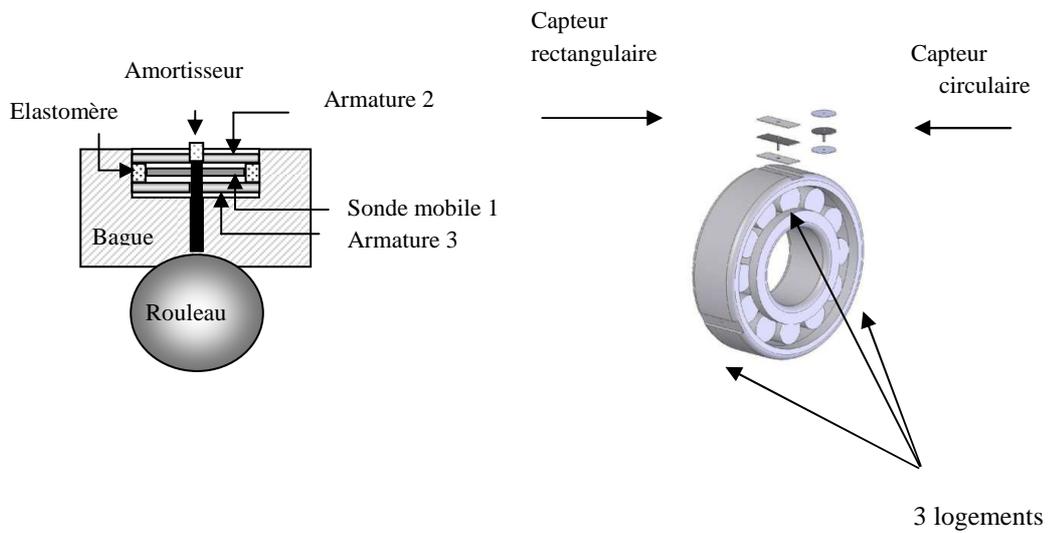


Figure 5 : Schématisation de la sonde capacitive.

Figure 6 : Implantation des sondes sur la bague de roulement.

La déformation du lamage n'est pas plane et pour rester dans l'hypothèse du condensateur plan les armatures 1 et 2 sont constituées de deux lamelles en rilsan recouvertes d'un dépôt électrolytique conducteur. Ces lamelles sont solidaires des parois latérales du rainurage.

La sonde capacitive est fixée rigidement sur une tige de rappel en acier. Cette tige est toujours maintenue en contact avec le fond du perçage grâce à un élastomère situé à l'autre extrémité. Deux amortisseurs liés aux parois latérales

assurent la bande passante mécanique de la sonde aux fréquences d'utilisations.

La sonde mobile 1 se déplace, perpendiculairement à son plan entre les deux armatures fixes 2 et 3 solidaires de la bague du roulement. Trois sondes identiques sont implantées sur la bague du roulement (Fig 6). Elles permettent de détecter le plan contenant les efforts principaux.

3. Simulation numérique des déformations et point de fonctionnement mécanique de la sonde.

Des simulations numériques ont été effectuées avec le logiciel ABAQUS; on considère l'élément roulant indéformable, on néglige le frottement de contact et l'influence de la lubrification. Le modèle utilisé ici est un contact plan/cylindre. Les différentes symétries permettent de ne modéliser que le quart du dispositif (Fig 7). Le cylindre de diamètre 12 mm et de longueur 20 mm est uniformément chargé. La charge maximale appliquée sur le cylindre induit une pression de Hertz au contact $p_{max} \leq 4 \text{ GPa}$. Pour respecter cette contrainte la charge maxi répartie sur le rouleau ne doit pas dépasser 219 MPa soit une force de 52560 N sur le demi-rouleau.

La simulation permet d'accéder aux isovaleurs de déformation suivant la direction U2, perpendiculaire au plan de contact des solides, pour différentes valeurs de la charge (Fig. 7). La figure correspond à la charge maximum. Les résultats numériques (tableau 1) donnent les déplacements de chacun des points situés :

- le long de l'axe de symétrie Oz en fonction de la charge imposée
- sur la surface du lamage (Fig. 8).
- Le déplacement entre le point 9 situé près de la contrainte maximum, et le point 15 situé sur la première surface du capteur est de 31 μm (Fig. 8).

Ces résultats permettent d'établir le différentiel de déplacement entre le point 9 et le point 15 situés à une distance $l=7 \text{ mm}$ l'un de l'autre, en fonction de la charge. Le choix de la position de ces deux points sur l'axe vertical Oz défini par la profondeur du perçage ainsi que la distance les séparant déterminent « l'étendue de mesure utile » : (EMU) ainsi que et la sensibilité mécanique $S_{Mi/j}$ de la sonde (admittance mécanique).

Nous avons :

- La souplesse mécanique est : $S_{M9/15}=0,05 \mu\text{m}/100\text{N}$
- La raideur mécanique est : $K_{M9/15} = 2000 \text{ N}/\mu\text{m}$

L'étendue de mesure utile (EMU) est alors de 31 μm pour la charge variant de 0% à 100%.

point	Oz	20%	45%	85%	100%
1	10	13,88	31,17	58,77	68,82
225	9,66	11,45	25,77	48,69	57,12
9	9	9,4	21,15	39,94	46,94
15	2	3,2	7,24	13,68	16,1
251	2	2,8	6,3	11,9	14
11	0	0	0	0	0

Tableau 1. Déplacements en μm dans la direction verticale suivant le % de la charge maxi.

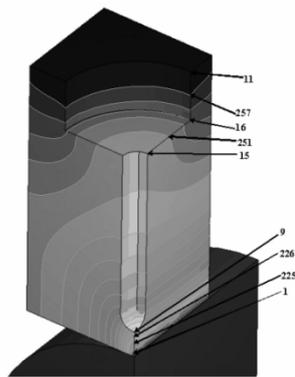


Figure 7 : Isovaleurs des déformations pour une charge donnée.

4. Modélisation électrique de la sonde capacitive et conditionnement des signaux

4.1.1 Modélisation de la sonde.

Le dispositif réalise un double condensateur à écartements variables dont les variations de capacité dans le temps traduisent les déplacements. Le diélectrique est l'air, les pertes sont donc négligeables et les impédances se réduisent à celles des capacités.

Lors du montage des roulements, la bague tournante par rapport à la direction de la charge radiale doit être montée serrée et la bague fixe est glissante. L'ajustement sur la bague tournante est de type serré H7k6. Cela induit une déformation dans l'épaisseur de la bague tournante de l'ordre de 10^{-3} mm.

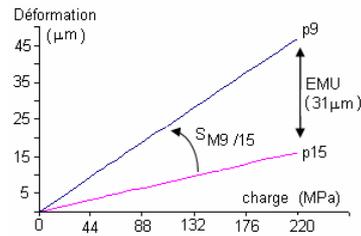


Figure 8 : Déplacement relatif des points et sensibilité mécanique du dispositif.

$$S_{M9} = 0,21 \mu\text{m} / \text{MPa} \Rightarrow 0,21 \mu\text{m pour } 240\text{N}$$

$$S_{M15} = 0,09 \mu\text{m} / \text{MPa} \Rightarrow 0,09 \mu\text{m pour } 240\text{N}$$

$$S_{M9/15} = 0,12 \mu\text{m} / \text{MPa} \Rightarrow 0,12 \mu\text{m pour } 240\text{N}$$

Ces nouvelles contraintes sont transmises, en partie, par les éléments roulants à la bague fixe et entraîne une très faible déformation de celle-ci de quelques microns. Les sondes capacitatives étant intégrées à la bague fixe, leurs points de fonctionnement sont modifiés. Les équations du modèle électrique deviennent [1] et [2].

$$C_{S1} = \frac{\epsilon_0 \cdot S}{D_1 \pm \Delta d} = \frac{\epsilon_0 \cdot S}{D_0 + \delta} \cdot \frac{1}{1 \pm \frac{\Delta d}{D_0 + \delta}} = C_1 \cdot \frac{1}{1 \pm \frac{\Delta d}{D_0 + \delta}} \quad [1]$$

$$\delta = \frac{\epsilon_0 \cdot S}{D_2 \mu \Delta d} = \frac{\epsilon_0 \cdot S}{D_0 - \delta} \cdot \frac{1}{1 \mu \frac{\Delta d}{D_0 - \delta}} = C_2 \cdot \frac{1}{1 \mu \frac{\Delta d}{D_0 - \delta}} \quad [2]$$

Soit pour un capteur i :
$$\Delta C_i(t) \approx \frac{2C_0}{D_0} \left[\delta_i + \sum_j \Delta d_j(t) \right] \quad [3] \text{ Au premier ordre près}$$

La variation $\Delta C_i(t)$ est due à des efforts statiques lors du montage du roulement et des efforts dynamiques qui induisent respectivement les déplacements δ_i et $\Delta d_i(t)$

[3].

Pour les trois capteurs à 120°, on peut accéder à l'équation vectorielle [4]

$$\sum_{i=1}^3 \overrightarrow{\Delta C_i}(t) = \frac{2 \cdot C_0}{D_0} \left[\sum_{i=1}^3 \overrightarrow{\delta_i} + \sum_{i=1}^3 \sum_j \overrightarrow{\Delta d_{ij}}(t) \right] \quad [4]$$

S'il existe des efforts statiques supplémentaires s'exerçant sur les roulements, nous obtenons l'équation (5) pour un capteur i :

$$\Delta C_i(t) \approx \frac{2C_0}{D_0} \left[\overrightarrow{\delta_i} + \overrightarrow{\lambda_i} + \sum_j \overrightarrow{\Delta d_{ij}}(t) \right] \quad [5]$$

De même, on peut accéder à l'équation vectorielle (6)

$$\sum_{i=1}^3 \overrightarrow{\Delta C_i}(t) = \frac{2 \cdot C_0}{D_0} \left[\sum_{i=1}^3 \overrightarrow{\delta_i} + \sum_i \overrightarrow{\lambda_i} + \sum_{i=1}^3 \sum_j \overrightarrow{\Delta d_{ij}}(t) \right] \quad [6]$$

La somme algébrique des composantes des vecteurs déplacements dues au serrage de la bague tournante est nulle.

$\sum_{i=1}^3 \overrightarrow{\delta_i} = \vec{0}$ car les efforts de serrage sont uniformément repartis sur la bague du roulement. On obtient l'équation [7] :

$$\sum_{i=1}^3 \overrightarrow{\Delta C_i}(t) = \frac{2 \cdot C_0}{D_0} \left[\sum_i \overrightarrow{\lambda_i} + \sum_{i=1}^3 \sum_j \overrightarrow{\Delta d_{ij}}(t) \right] \quad [7]$$

$\sum_i \overrightarrow{\lambda_i}$ et $\sum_j \overrightarrow{\Delta d_{ij}}(t)$ représentent les sommes vectorielles des déplacements dus

aux efforts statiques et dynamiques radiaux exercés sur le roulement. Ces deux termes caractérisent les deux aspects du fonctionnement de la sonde capacitive.

4.1.2 Points de fonctionnement de la sonde.

Les variations des capacités des condensateurs en fonction du déplacement relatif des armatures sont représentées ci-dessous (Fig. 9).

Nous avons aux points M_0 , M_1 , M_2 les sensibilités suivantes :

$$S_{C_0} = -\frac{\varepsilon_0 S}{D_0^2} ; S_{C_1} = -\frac{\varepsilon_0 S}{D_1^2} = -\frac{\varepsilon_0 S}{[D_0 + (\delta + \lambda)]^2} , S_{C_2} = -\frac{\varepsilon_0 S}{D_2^2} = -\frac{\varepsilon_0 S}{[D_0 - (\delta + \lambda)]^2}$$

S étant la surface active de la sonde.

Pour des petites variations de déplacement autour de ces points de fonctionnement, les valeurs des capacités sont :

$$C_0 = \frac{\varepsilon S}{(D_0 \pm \Delta d)} \quad C_{S1} = \frac{\varepsilon_0 S}{[(D_0 + \delta + \lambda) + \Delta d]} \quad C_{S2} = \frac{\varepsilon_0 S}{[(D_0 - \delta - \lambda) - \Delta d]}$$

D'où :

$$\Delta C_{sonde} = C_{S1} - C_{S2} = \frac{\epsilon_0 S}{D_0^2} \cdot \frac{2(\delta + \lambda + \Delta d)}{1 - \left(\frac{\delta + \lambda + \Delta d}{D_0}\right)^2}$$

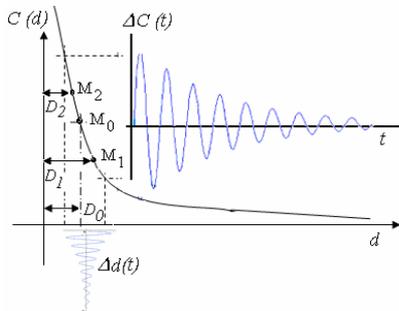


Figure 9 : Points de fonctionnement de la sonde capacitive.

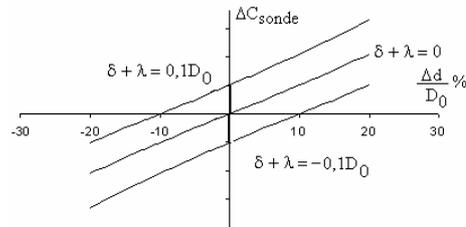


Figure 10 : Evolution de ΔC_{sonde} sur 20 % de l'étendue de mesure.

Le développement limité du dénominateur à l'ordre deux nous donne l'équation [8] :

Soit :
$$\Delta C_{sonde} = 2 \cdot \frac{\epsilon_0 S}{D_0^2} \cdot (\delta + \lambda + \Delta d) (1 + \epsilon^2) \quad [8]$$

$\epsilon^2 = \left(\frac{\delta + \lambda + \Delta d}{D_0}\right)^2$ représente l'erreur de linéarité qui sera déterminé en pourcentage de l'étendue de mesure de la sonde. Si on considère le domaine où ϵ^2 est négligeable, alors :

$$\Delta C_{sonde} = 2 |S_{C_0}| (\delta + \lambda) + 2 |S_{C_0}| \Delta d(t) \quad \Delta C_{sonde} = \Delta C_{statique} + \Delta C_{dynamique}$$

Pour une sonde donnée, l'étendue de mesure dépend du point de fonctionnement choisi. La sensibilité de la capacité S_{C0} varie en raison inverse du

carré de l'étendue de mesure. La sensibilité de la sonde pourra être considérée comme constante pour des petits déplacements autour d'un point de fonctionnement

5. Conditionnement des signaux et montage expérimental

Il s'agit de mesurer précisément des petites variations de capacités qui traduisent les déplacements ($\delta_i + \lambda_i$) et $\pm \Delta d_i$. La sonde capacitive constitue deux condensateurs C_{S1} et C_{S2} utilisés en fonctionnement push-pull. Plusieurs conditionneurs sont possibles pour réaliser la mesure de $\Delta C = C_{S1} - C_{S2}$. La solution retenue qui est constituée par deux amplificateurs de charges est décrite figure 11.

Si les valeurs des capacités des condensateurs de retours sont rigoureusement les mêmes :

$$\Delta V_{outi} = \frac{V_e}{C_f} \cdot \frac{2C_0}{D_0} \left[\delta_i + \lambda_i + \sum_j \Delta d_{ij}(t) \right] \quad \Delta V_{sonde} = \Delta V_{statique} + \Delta V_{dynamique}$$

$$V_e(t) = V + V_{max} \sin \omega t \quad \omega > 10 \text{ kHz}$$

$$\Delta V_{outi} = K \left[V \left(\delta_i + \lambda_i + \sum_j \Delta d_{ij}(t) \right) + V_{max} \sin \omega t \left(\delta_i + \lambda_i + \sum_j \Delta d_{ij}(t) \right) \right]$$

$$K = \frac{2C_0}{C_f D_0}$$

$$\Delta V_{outiFiltre} = KV \left(\delta_i + \lambda_i + \sum_j \Delta d_{ij}(t) \right)$$

Nous avons réalisé un démonstrateur (Fig. 12) pour effectuer sur une machine à essai de traction-compression, **la mesure des déformations dues aux efforts statiques.**

Les caractéristiques liées à la sonde capacitive et à son conditionneur sont :

$$\begin{aligned} \text{Surface active de la sonde : } S &= 51 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2, & \text{L'étendue de mesure utile : } EMU &= \pm 3 \mu\text{m} \\ \text{Permittivité de l'air : } \epsilon_0 &= 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ pF/m}, & \text{Sensibilité mécanique : } S_{M9/15} &= 0,05 \mu\text{m}/100\text{N} \\ \text{Condensateur de retour : } C_f &= 10 \text{ pF}, & \text{Raideur mécanique : } K_{M9/15} &= 2000 \text{ N}/\mu\text{m} \end{aligned}$$

$$\text{Tension d'entraînement : } V_e(t) = 1 + 1 \sin(2\pi \cdot 10^4 t)$$

Pour une linéarité de 1 % sur l'étendue de mesure utile il faut une distance $D_0 =$

$$10 \text{ EMU} = 30 \mu\text{m} : \quad \varepsilon^2 = \left(\frac{\text{EM}}{D} \right)^2 = \left(\frac{3}{30} \right)^2 = 1\%$$

Le point de fonctionnement électrique de la sonde correspond à :

$$C_0 = 15 \text{ pF} \quad \text{et} \quad |S_{C0}| = 0,5 \text{ pF} / \mu\text{m} \Rightarrow KV = \frac{2C_0}{C_f D_0} = 10^5 \text{ V} / \text{m} = 0,1 \text{ V} / \mu\text{m}$$

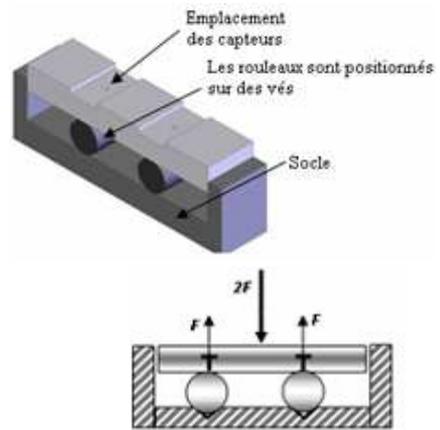
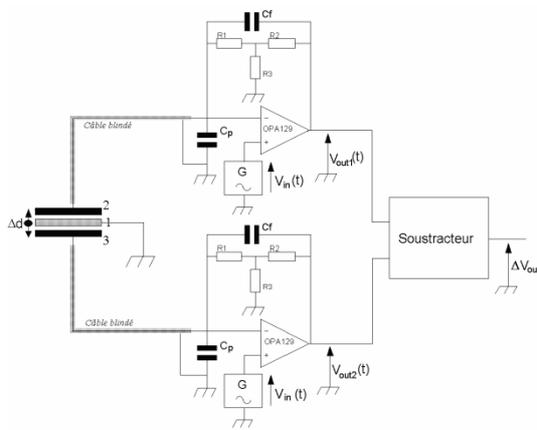


Figure 11 : Conditionnement des signaux

Figure 12 : Schéma du dispositif d'essai.

On relève donc l'effort $2F$ imposé et la tension $\Delta V_{\text{oufiltré}}$.

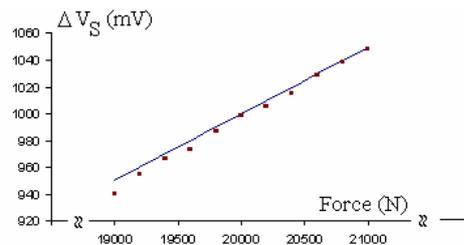
6. Les résultats expérimentaux

Les efforts statiques F (exprimées en Newton) s'exerçant sur la bague sont reliés aux déformations expérimentaux par la raideur mécanique de la sonde:

$$\Delta V_{\text{oufiltré}} = KV\lambda \quad \text{mais} : \lambda = \frac{F}{K_{Mi/j}}$$

$$\Rightarrow F = \frac{K_{Mi/j} \Delta V_{\text{oufiltré}}}{KV} = \frac{2000}{0,1} \Delta V_{\text{oufiltré}}$$

Figure 13 : Résultats



7. Conclusion

L'étude théorique ainsi que la réalisation d'un démonstrateur ont montré qu'il est possible d'intégrer une sonde capacitive dans la bague d'un roulement afin de mesurer les efforts radiaux qui s'exercent sur celui-ci. Ce travail se poursuit par la réalisation d'un prototype directement intégré à la bague du roulement.

Par la suite, nous nous proposons de développer des sondes capacitives capables de mesurer les déplacements axiaux et radiaux afin de mesurer les efforts dans les trois dimensions.

A partir des capteurs implantés sur le roulement, des procédures d'analyse temporelles et fréquentielles vont être développées afin de déterminer l'intensité, la direction et la variation au cours du temps des forces qui s'exercent sur le roulement.

Bibliographie

Hills, D.A., Nowell, D., Sackfield, A.,” *Mechanics of elastic contact*”, Oxford: Butterworth-Heinemann, 496p, 1993.

Bonse W., Mul C., and J. W. Spronck, *Finite-Element Modelling as a Tool for Designing Capacitive Position Sensors*, Sensors and Actuators, A 46-47: pp. 266-269, 1995.

Alexander A Trusov “*Nonlinear Effects in Control of Capacitive Resonant Microstructures*”, Master of Science in Mechanical and Aerospace Engineering, University of California, Irvine, 2006.

Philip T. Smith Jr. “*Analysis and application of capacitive displacement sensors to curved surfaces*” PhD Thesis Lexington, Kentucky, 2003.

Hongshen Ma. “*Capacitive Displacement Sensing for the Nanogate*”, Masters of Science in Media Arts and Sciences, Massachusetts Institute of Technology, 2004.

Baxter, L., *Capacitive Sensors: Design and Applications*. IEEE Press Series on Electronics Technology. 1996.



Patrick Marconnet a reçu son diplôme d'ingénieur en construction mécanique d'ENIM en 1979 et son doctorat en mécanique de l'Université de Reims Champagne-Ardenne en 1993.

Depuis 1994 il est maître de conférences à l'Université de Reims Champagne-Ardenne et membre du laboratoire GRESPI. Ses sujets principaux portent sur la maintenance conditionnelle, la construction mécanique, l'analyse vibratoire et acoustique



Bernard Pottier a reçu son diplôme d'ingénieur en construction mécanique à l'INSA de Lyon en 1983 et son Doctorat en Génie Informatique Automatique et Traitement du signal de l'Université de Reims

Champagne-Ardenne en 1989. Depuis 1991, il est maître de conférences à l'Université de Reims-Champagne-Ardenne et membre du laboratoire CRESTIC. Ses sujets principaux sont l'instrumentation, la construction mécanique et le traitement de signal avec comme thèmes principaux la séparation aveugle de sources et l'analyse en composante indépendante.



Lanto Rasolofondraibe a reçu son doctorat en Génie Informatique Automatique et Traitement du signal de l'Université de Reims Champagne-Ardenne en 1995.

Depuis 1999 il est maître de conférences à l'Université de Reims Champagne-Ardenne et membre du laboratoire CRESTIC. Ses sujets principaux portent sur l'instrumentation, l'analyse vibratoire et le traitement de signal avec les thèmes principaux suivants : les ondelettes, la Décomposition Empirique Modale, la séparation aveugle de sources et l'analyse en composante indépendante.



Danielle Nuzillard a reçu son doctorat en électronique de l'Université de Paris XI, Orsay, en 1986.

Elle est professeur des universités depuis 2003 à l'Université de Reims Champagne-Ardenne et membre du laboratoire CRESTIC. Ses sujets principaux sont l'instrumentation, le signal et le traitement d'image lié à la séparation aveugle de sources aveugle et à l'analyse en composante indépendante.

Morphologie des copeaux à grande vitesse

Gautier LIST*, Guy SUTTER, Xuefeng BI*****

** Université Paul Verlaine - IUT de Metz -
Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux (LPMM), FRE
CNRS 3236,
Ile du Saulcy, 57045 Metz Cedex01*

*** IUT de Metz - Université Paul Verlaine - Metz
Département Génie Mécanique
Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux (LPMM), FRE
CNRS 3236,
Ile du Saulcy, 57045 Metz Cedex01*

**** Northeastern University
Laboratory of Advanced Manufacturing and Automation,
P.B.319, 110004, Shenyang, China*

***gautier.list@univ-metz.fr ; sutter@lpmm.univ-metz.fr ;
xuefeng.bi@gmail.com***

RESUME : La morphologie des copeaux est un paramètre important pour l'étude des performances des outils (usure et durée de vie). L'objectif de ce travail est d'analyser l'influence de l'enroulement du copeau sur la longueur de contact avec l'outil au moyen d'observations expérimentales en temps réel lors de la coupe à grande vitesse. Les essais de coupe sont effectués sur banc d'essai balistique reproduisant parfaitement la condition de coupe orthogonale et autorisant la prise d'images à l'aide d'une caméra rapide CCD intensifiée.

MOTS-CLÉS : Usinage à Grande Vitesse, contact outil-copeau, courbure du copeau.

1. Introduction

D'utilisation fréquente dans le domaine de l'aéronautique, l'Usinage à

Grande Vitesse (UGV) présente certains avantages tels que l'amélioration des états de surfaces, la minimisation des efforts de coupe et l'augmentation de la productivité, (Schulz 1997, Dolinšek 2004). Cependant, pour assurer l'intégrité des surfaces usinées, la maîtrise de ce procédé d'enlèvement de matière est nécessaire. Le contrôle des copeaux en production est reconnu dans le domaine de l'usinage comme un facteur aussi important que l'usure, l'état de surface de la pièce finie, la puissance de coupe ou la précision dimensionnelle. Ce contrôle implique généralement deux tâches : (1) éviter la formation de longs copeaux qui peuvent s'enchevêtrer dans la machine-outil (2) évacuer le copeau de manière à prévenir l'endommagement des surfaces usinées par contact avec celui-ci. L'évacuation et la fragmentation des copeaux sont maîtrisées par la connaissance de leur morphologie, caractérisée par sa longueur de contact avec l'outil et son rayon de courbure. Par ailleurs, ces deux paramètres influencent également fortement les mécanismes d'endommagement de l'outil tel que, par exemple, l'usure en cratère. Dans ce travail, nous proposons d'étudier la morphologie des copeaux obtenus en UGV à l'aide d'un dispositif de laboratoire d'essais balistiques couplé à une caméra grande vitesse destinée à observer le processus de coupe en temps réel.

2. Maîtrise de la formation du copeau

Après avoir subi une forte déformation dans la première zone de cisaillement, le copeau en formation glisse sur la face de coupe de l'outil sur une longueur L_c dite de contact. Il est alors généralement observé deux étapes dans la formation du copeau. Etape I : le copeau se forme avec un rayon de courbure R_0 appelé rayon initial ou rayon naturel de courbure comme illustré dans la Fig. 1a. Lorsque le copeau ne rencontre pas d'obstacle, cette étape se conclut par l'impact de l'extrémité du copeau sur la pièce. Si le copeau ne se brise pas naturellement, il entre dans la phase II, comme illustré par la Fig. 1b. Le copeau continue alors de croître sous forme de spirale avec une augmentation de son rayon de courbure noté alors ici R . L'étape II est bien sûr à éviter pour limiter l'endommagement de la surface usinée. Pour éviter que le copeau n'entre en contact avec la pièce, il est recommandé de générer des copeaux fragmentés de petites tailles. La fragmentation du copeau est fortement liée aux types d'opérations d'usinage, aux conditions de coupe, à la géométrie de l'outil et au matériau usiné. Certains copeaux se fragmentent naturellement suite aux phénomènes d'endommagement ou de cisaillement adiabatique dans les zones de forte déformation plastique. Mais dans le cas général, pour faciliter ou forcer la fragmentation, des outils avec brise-copeaux sur la face de coupe sont fréquemment employés (cf. Fig. 1c). Le brise-copeaux est choisi de manière à appliquer une force de flexion suffisante sur le copeau pour que la déformation maximale induite conduise à la rupture du

copeau. D'après le critère classique de rupture proposé par (Nakayama, 1962), lorsque cette déformation est suffisante pour atteindre la contrainte à la rupture du matériau, le copeau se brise.

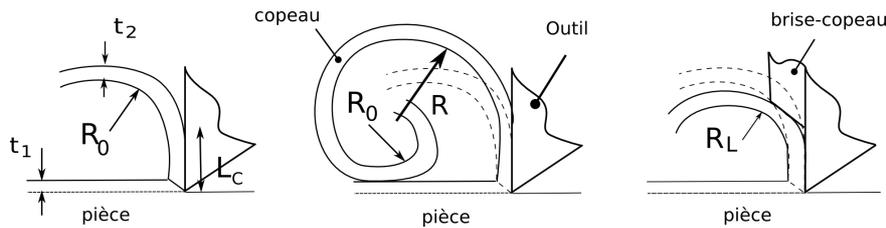


Figure 1 : Les différentes étapes d'enroulement d'un copeau en coupe orthogonale.

Cette déformation maximale est proportionnelle à l'épaisseur du copeau t_2 et dépend à la fois du rayon naturel R_0 (ou R) et du rayon de courbure R_L imposé par le brise-copeaux en suivant l'équation:

$$\varepsilon_{\max} \approx \frac{t_2}{2} \left[\frac{1}{R_L} - \frac{1}{R_0} \right] \quad (1)$$

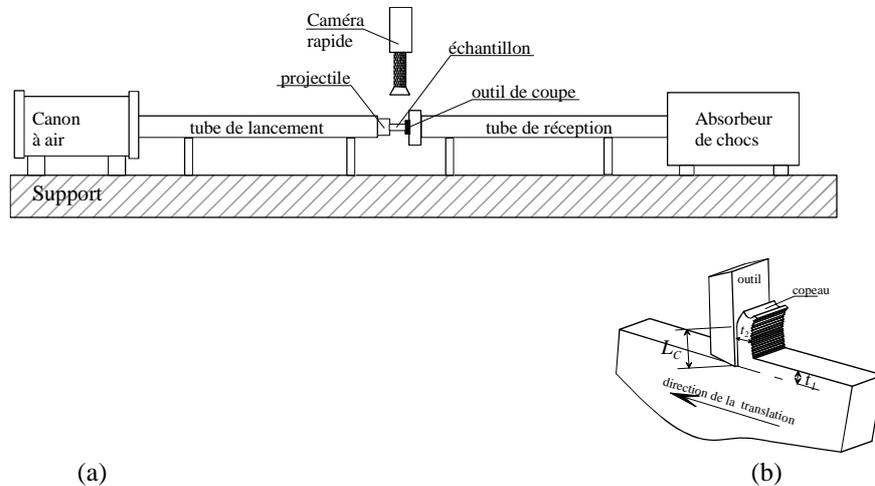
La géométrie et la position du brise-copeaux doivent donc être soigneusement choisies. L'efficacité du brise-copeaux dépendra de : (1) le rayon de courbure du copeau (2) la longueur de contact. Ces deux paramètres sont intimement liés et dépendent fortement des conditions de coupe (Cook, 1963, Stephen 1998). Les mécanismes qui conduisent à la courbure du copeau sont encore très mal connus et les travaux sur la longueur de contact concernent, dans la majorité des cas, l'usinage conventionnel. La longueur L_c est habituellement représentée comme fonction de la vitesse de coupe, de l'avance, de la profondeur de passe (Sadik et al., 1995). Différents modèles proposés pour déterminer L_c sont résumés dans le Tableau 1, où L_s est la longueur de la zone du contact collant, t_1 la profondeur de passe (ou avance), t_2 l'épaisseur du copeau, α l'angle de coupe, ϕ l'angle de cisaillement, θ l'angle d'inclinaison de l'effort de coupe avec l'angle de cisaillement, ξ le rapport t_2/t_1 et V_c la vitesse de coupe.

Modèle	Référence
$L_c = \frac{t_1 \cdot \sin \theta}{\sin \phi \cdot \cos[\theta + \alpha - \phi]}$	Tay et al., 1976
$\frac{L_s}{t_1} = \frac{\sqrt{2}}{\sin \phi \sin(45 + \phi - \alpha)}$	Lee and Shaffer, 1951
$L_s = t_1(\xi(1 - \tan \alpha) + \sec \alpha)$	Abuladze 1962
$L_c = 2t_2$	Toropov et al., 2003
$L_c = 1.92t_2 - 0.09t_1$	Sutter 2005
$L_c = t_1(1.61\xi - 0.28)$	Marinov 2001
$L_c = 0.485 + 0.0028 \cdot V_c$	Stephenson et al., 1997
$L_c = 8.677 \times 10^{-5} \cdot t_1^{0.515} \cdot V_c^{-0.065} \cdot (90^\circ - \alpha)^{0.733}$	Zhang et al., 1991

Tableau 1. Modèles prédictifs de la longueur de contact outil-copeau

3. Dispositif expérimental

Afin d'étudier l'évolution de la morphologie du copeau en UGV, les essais de coupe sont réalisés sur un dispositif spécifique de laboratoire développé à l'Université de Metz. Ce dispositif d'essai balistique, qui permet de reproduire des conditions de coupe orthogonale, est équipé d'une caméra numérique grande vitesse, comme illustré Fig. 2. Sur ce dispositif, la vitesse du projectile (ou vitesse de coupe) peut atteindre 120 m/s (7200 m/min).



(a) **Fig. 2 (a)** Schéma du dispositif balistique

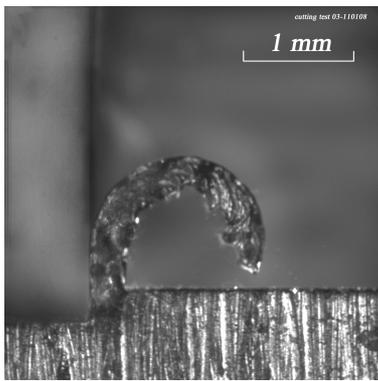
(b) **Détails de la condition orthogonale de coupe.**

La rigidité du système et sa grande accessibilité permet la prise d'images, avec un fort grossissement, du processus de coupe en temps réel (Sutter 2005, Ranc et al., 2004, Sutter et al., 2004). Durant les essais, un projectile portant l'échantillon en acier à faible teneur en carbone (type C20), est lancé afin d'être usiné sur une longueur de 10 mm, à l'aide d'un outil fixe en carbure non revêtu et à face de coupe plane. L'angle de coupe est de 0° et l'angle de dépouille de 7° . La vitesse de coupe est fixée à 17 m/s tandis que l'avance t_1 varie dans une large gamme comprise entre $0,03 \text{ mm}$ et $0,65 \text{ mm}$. Ces conditions de coupe conduisent à la formation de copeaux continus, ce qui favorise la mesure et le suivi de la morphologie du fragment usiné.

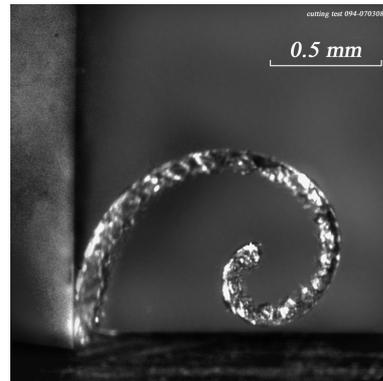
La longueur de contact, le rayon de courbure initial R_0 (étape I) ainsi que le rayon de courbure en spirale R (étape II) sont ainsi directement mesurés sur les images prises pendant le processus de coupe.

4. Résultats et discussion

La Figure 3a montre un copeau en formation dans la phase I tandis que la figure 3b montre un copeau dans la phase II. Pour les grandes avances telles que $t_1 = 0,3 \text{ mm}$, le copeau se brise avant d'atteindre l'étape II.



(a)



(b)

Figure 3 : Morphologies des copeaux photographiés par la caméra grande vitesse.

$V_c = 17 \text{ m/s}$; (a) $t_l = 0,3 \text{ mm}$, $L_c = 0,58 \text{ mm}$ (b) $t_l = 0,09 \text{ mm}$, $L_c = 0,32 \text{ mm}$

Par contre, pour des avances plus faibles comme $t_l = 0,09 \text{ mm}$, le copeau poursuit sa formation en spirale après être entré en contact avec la pièce. Sa courbure et la zone contact s'en trouvent modifiées. Les courbes d'évolution du contact et de la courbure comme fonction de l'avance t_l (Fig. 3 et Fig. 4) montrent clairement qu'une transition dans le comportement s'opère autour de $t_l = 0,1 \text{ mm}$.

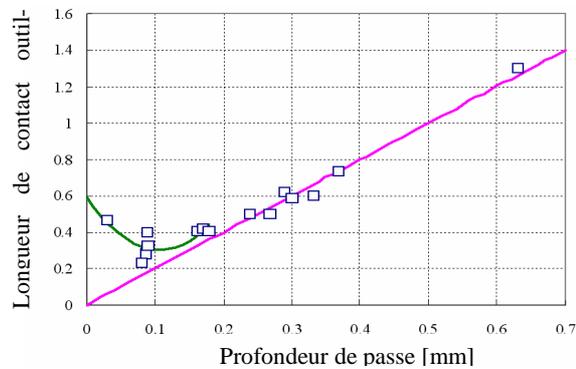


Fig. 4. Evolution de la longueur de contact outil-copeau avec la profondeur de passe.

La longueur de contact L_c est généralement décrite comme une fonction croissante de l'épaisseur t_2 et donc de t_1 . Nous retrouvons bien cette tendance à partir de $t_1 = 0,1 \text{ mm}$ où L_c croît linéairement avec t_1 , en suivant l'équation $L_c \approx 2 t_1$ en accord avec des résultats précédents ((Toropov et al., 2003, Sutter, 2005). Toutefois, pour $t_1 < 0,1 \text{ mm}$ la tendance est plus complexe. On trouve par exemple pour $t_1 = 0,03 \text{ mm}$, $L_c \approx 15t_1$, ce qui est loin d'être prédit par les modèles précédents. Cette constatation doit être mise relation avec l'évolution du rayon de courbure. En effet, la Fig. 5 présente une allure similaire à la Fig. 4 pour les mêmes conditions de coupe. Pour établir la courbe de la Fig. 5, le rayon initial R_0 est mesuré soit lorsque le copeau n'est pas encore en contact avec la pièce, en phase I, (ce qui est toujours de cas pour les grandes avances), soit à l'extrémité du copeau quand le copeau forme une spirale en phase II. Mais comme le montrent les résultats autour de $t_1 = 0,08 \text{ mm}$, la variation d'évolution du rayon reste faible entre les deux configurations en accord avec (Batzer, 1998, Cook, 1963). Nous observons pour les plus faibles avances ($t_1 = 0,03 \text{ mm}$), que le copeau a naturellement tendance à s'écouler de façon plus droite le long de l'interface outil-copeau, ce qui entraîne une longueur de contact élevée. En augmentant l'avance jusqu'à environ $t_1 = 0,1 \text{ mm}$, la courbure du copeau est plus prononcée et le rayon R_0 diminue. Les mécanismes de formation dans la phase II ($R > R_0$) avec les copeaux en spirale maintiennent toutefois L_c à des valeurs relativement importantes. A partir de $t_1 = 0,1 \text{ mm}$, la phase II n'est plus observée et tout comme la longueur de contact L_c , le rayon de courbure R_0 suit une croissance linéaire avec l'avance t_1 que l'on peut décrire approximativement par $R_0 \approx 3,3 t_1$. Nous obtenons ainsi la relation suivante entre la longueur de contact et le rayon de courbure : $L_c \approx 0,6 R_0$.

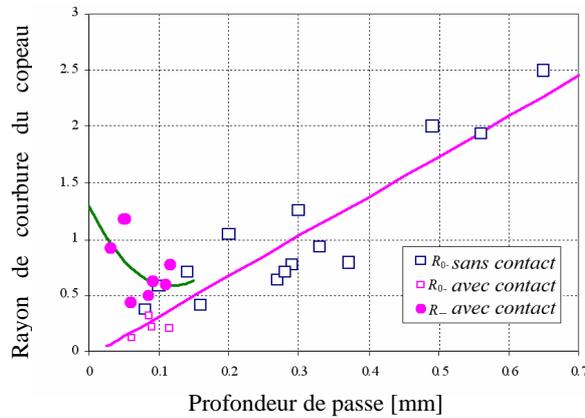


Figure 4 : Evolution du rayon de courbure du copeau avec la profondeur de passe.

5. Conclusion

Dans ce travail, la morphologie des copeaux est étudiée dans le domaine de l'Usinage à Grande Vitesse ($V_c=17 \text{ m/s}$) à partir de photographies prises par une caméra rapide équipant un dispositif d'essai balistique de coupe. Deux phases sont observées dans la formation du copeau. La phase I où le copeau se forme naturellement sans contact avec la pièce et la phase II où l'extrémité du copeau entre en contact avec la pièce. Dans la phase II, le copeau évolue en forme de spirale faisant évoluer sa morphologie par une modification de sa courbure et par conséquent sa longueur de contact avec l'outil. Seule la phase I est observée pour les avances supérieures à $0,1 \text{ mm}$ où à la fois le rayon de courbure et la longueur de contact suivent une fonction linéaire et croissante de l'avance t_1 . La phase II est uniquement observée pour les avances inférieures à $0,1 \text{ mm}$ où les phénomènes de courbure et d'enroulement du copeau sont accentués. Les évolutions de R_0 et L_c avec t_1 sont complexes, mais la courbure du copeau et la longueur de contact restent étroitement liées, en suivant toujours la même tendance. Une attention particulière doit donc être portée à l'étude des faibles avances, puisqu'elles sont généralement utilisées en UGV, afin de limiter la puissance consommée et améliorer la stabilité de l'outil.

Bibliographie

Abukhshim N. A., Mativenga P. T., and Sheikh M. A., « An investigation of the tool-chip contact length and wear in high-speed turning of EN19 steel », Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of

Engineering Manufacture , vol.218, 2004, p. 889-903.

Abuladze N.G. « Character and the Length of Tool-Chip Contact (en Russe) » Proceedings Machinability of Heat-resistant and Titanium Alloys, Kuibyshev, 1962, p. 68-78.

Batzer S. A. « An analytical and experimental investigation into chip morphology in orthogonal machining » PhD Thesis, Michigan technological university, USA, 1998.

Cook N. H., Jhaveri P. and Nayak N. «The mechanism of chip curl and its importance in metal cutting » Transactions of the ASME, 1963, p. 374-380.

Dolinšek S., Ekinović S. and Kopač J. «A contribution to the understanding of chip formation mechanism in high-speed cutting of hardened steel » Journal of Materials Processing Technology, vol. 157–158, 2004, p. 485-490.

Lee E.H. and Shaffer B.W. « The theory of plasticity applied to a problem of machining. », Journal of applied mechanics Journal of Applied Mechanics, vol. 18, 1951, p. 405-413.

Marinov V.R. « Hybrid analytical-numerical solution for the shear angle in orthogonal metal cutting – part II : experimental verification. », International Journal of Mechanical Sciences, vol. 43, 2001, p. 415-426.

Nakayama K. «A study on chip breaker » Bull. Jpn. Soc. Mech. Eng., vol.17, 1962, p. 142-150

Ranc N., Pina V., Sutter G. and Philippon S. « Temperature measurement by visible pyrometry - orthogonal cutting application », ASME Journal of Heat transfer, vol. 126, 2004, p. 931-936.

Sadik M. I. and Lindström B. «The effect of restricted contact length on tool performance » Journal of Materials Processing Technology, vol. 48, 1995, p. 275-282.

Stephenson D. A., Jen T. C. and Lavine A. S. « Cutting tool temperatures in contour turning: transient analysis and experimental verification » ASME J. Eng. Ind., vol. 119, 1997, p. 494-501.

Schulz H. « State of the art of high-speed machining » in: 1st French and German Conference on High Speed Machining, Metz University, France, 1997, p. 1-7.

Sutter G. « Chip geometries during high speed machining for orthogonal cutting conditions », International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 45, 2005, p. 719-726.

Sutter G. and Ranc N. « Temperature fields in a chip during high speed orthogonal cutting - an experimental investigation », International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 47, 2007, p. 1507-1517.

Tay A. O., G. Stevenson M., Davis G.V. and Oxley P. L. B. « A numerical method for calculation temperature distribution in machining from force and shear angle measurement. », International Journal of Machine Tool Design and Research, vol. 16, 1976, p. 335-349.

Toropov A. and Ko S.L., « Prediction of tool-chip contact length using a new slip-line solution for orthogonal cutting. », *International Journal Tools and Manufacture*, vol. **43**, 2003, p. 1209-1215.

Zhang H. T., Liu P. D. and Hu R. S. « A three-zone model and solution of shear angle in orthogonal machining » *Wear*, vol.143, 1991, p. 29-43

** Université Paul Verlaine - IUT de Metz
Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux (LPMM), UMR C
7554, Ile du Saulcy, 57045 Metz Cedex01*



Gautier.list@univ-metz.fr

G. List est maître de conférences au Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux de l'Université Paul Verlaine – Metz. Son activité de recherche au sein de l'équipe M2CE (Mécanique et Matériaux en Conditions Extrêmes) s'articule autour des thématiques de l'usinage grande vitesse/ à sec, de la tribologie, l'usinage des outils de coupe, du frottement dynamique et du comportement mécanique des matériaux sous sollicitations extrêmes.

*** IUT de Metz - Université Paul Verlaine
Département Génie Mécanique
Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux (LPMM), UMR C
7554, Ile du Saulcy, 57045 Metz Cedex01
sutter@lpmm.univ-metz.fr*



G. Sutter est professeur à l'IUT de Metz et conduit ses recherches au Laboratoire de Physique et mécanique des matériaux de l'Université Paul Verlaine – Metz. Il co-dirige le groupe " Mécanique et Matériaux en Conditions Extrêmes (M2CE)". Ses thématiques de recherche s'articulent autour du développement d'outils expérimentaux novateurs, permettant de mieux appréhender les phénomènes présents lors des interactions dynamiques. Les sujets abordés sont l'usinage à grande vitesse, le frottement, le comportement des matériaux en conditions extrêmes, les mesures thermiques.



**** Northeastern University*

Laboratory of Advanced Manufacturing and Automation,

P.B.319, 110004, Shenyang, China

xuefeng.bi@gmail.com

Xuefeng Bi est doctorante en co-tutelle entre l'université de Paul Verlaine-M
la Northeastern University en Chine. Elle se spécialise sur l'ingénierie méca
et se concentre sur l'usure et les mécanismes de coupe des métaux.

Etude comparative des performances des Micro-antennes implantables et antennes de surface: Applications en Micro-spectroscopie RMN localisée

L. Fakri-Bouchet* #, A. Kadjo*, A. Briguet*, D. Graveron-Demilly*.

**Université Lyon1, CREATIS-LRMN CNRS UMR 5220, F-69622, Villeurbanne, France,*

#IUT B de Villeurbanne, 17, rue de France 69100 Villeurbanne: Départements : Génie Mécanique et Productique et Génie Electrique et Informatique Industrielle

LATIFA.BOUCHET@iutb.univ-lyon1.fr; Kadjo@univ-lyon1.fr;

danielle.graveron-demilly@univ-lyon1.fr; andre.briguet@univ-lyon1.fr

Sections de rattachement : 63^{ème}

Secteur : Secondaire

RESUME : *La spectroscopie par résonance magnétique nucléaire SRMN est une technique d'investigation des plus utilisées pour l'étude du métabolisme. Une des tendances actuelles, est l'analyse d'échantillons de faibles volumes de l'ordre du microlitre (μ l). L'instrumentation RMN conventionnelle (antennes et résonateurs) conduit à un rapport signal/bruit (S/B) faible, la raison principale étant les grandes dimensions des capteurs par rapport à ceux des échantillons. En adaptant ces dimensions, le facteur de remplissage est augmenté et par conséquent le rapport signal sur bruit (S/B) est amélioré ce qui permet d'optimiser la résolution spatiale et temporelle des acquisitions ainsi que la sensibilité des mesures.*

Le but de notre projet de recherche est le développement, la caractérisation et l'utilisation de micro-antennes planaires ($1000 \times 500 \mu$ m). Ces micro-capteurs, dédiés à la micro-spectroscopie et à la micro-imagerie RMN, sont fabriqués par des techniques de micro-électronique. Les prototypes actuels opèrent à 200 mégahertz (4,7 teslas) et sont destinés à l'étude in vivo des métabolites cérébraux de faible volume.

L'objectif de cet article est l'étude comparative entre les performances de la micro-antenne implantable et celle d'une antenne de surface conventionnelle (commerciale), par la mesure des limites de détection (LOD) et la détermination en conséquence du facteur de gain défini par la formule : $FOD = LOD_{antenne_surface} / LOD_{micro-antenne}$.

MOTS-CLES : *Micro-antennes implantables, antenne de surface, cartographie de champs radiofréquence, sensibilité en fonction de la concentration et de la masse (S_c et S_m), Limites de détection (LOD), métabolites cérébraux, RMN à minima invasive, micro-spectroscopie localisée, micro-imagerie.*

1. Introduction

Les recherches effectuées ces dernières années en Résonance Magnétique Nucléaire, ont démontré le besoin de techniques de détection de la RMN à l'aide de procédés et d'outils nanoscopiques. Devant la nécessité d'examiner par spectroscopie (ou par micro- imagerie RMN) de faibles quantités de matière, on peut recourir à des sondes dont le volume utile est très réduit (Schoeniger *et al.*, 1994) et utilisables de façon conventionnelle. Ainsi pour analyser des échantillons dont le volume est de l'ordre du nano litre, il faut dans un premier temps construire, par des techniques de micro-électronique, des résonateurs (circuits électriques résonnants et fortement couplés à l'échantillon) dont les dimensions sont de l'ordre de la centaine de micromètres (Peck *et al.*, 1995). Une fois ces antennes en présence de l'échantillon, le problème de la sensibilité reste celui rencontré classiquement (coefficient de remplissage, coefficient de qualité) mais avec une difficulté supplémentaire liée à la dimension des objets utilisés.

Durant la dernière décennie, de nombreuses études ont traité l'analyse des volumes limités (ordres de μl) : tissus, cultures de cellules, structures de protéine (Webb *et al.*, 2005; Ergolu *et al.*, 2003 ; Gimi *et al.*, 2003), ces expériences ont été réalisées à l'aide de micro-antennes de géométrie plane mais surtout de géométrie solénoïdale (Magin *et al.*, 1997; Webb *et al.* 2005; Olson *et al.*, 1999; 2004). Les investigations à l'aide de micro-antennes planes ont été proposées plus récemment par Massin et collaborateurs (Massin *et al.*, 2003; Ehrmann *et al.*, 2006) qui ont développé des micro-antennes planes de diamètre intérieur de $500\mu\text{m}$ fabriquées par des techniques de micro-électronique.

Notre projet a pour but de réaliser la miniaturisation de l'expérience de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) afin de pouvoir l'utiliser lors de l'observation d'échantillons de très faibles dimensions (inférieures au millimètre). En s'appuyant classiquement sur le couplage que l'on peut créer entre un échantillon contenant des noyaux doués de magnétisme (noyaux d'hydrogène, de phosphore, de sodium, etc..) et un résonateur électrique par l'intermédiaire d'un flux magnétique, il est envisageable de détecter et analyser des quantités de matière qui sont de l'ordre de la dizaine de pico mole, soit environ 10^{12} spins (Olson *et al.*, 2004).

L'application *in vivo* envisagée à plus long terme dans le cadre de ce projet porte sur « l'étude de la consommation énergétique cérébrale chez le rat au cours du cycle éveil sommeil par RMN en utilisant ces micro-capteurs ». En effet, la production et le stockage de l'énergie sont des facteurs homéostatiques déterminants étroitement liés à l'apparition du sommeil lent (SL) et paradoxal (SP) (Benington *et al.*, 1995, Maquet 1995). Il existe également une relation étroite entre l'activité neuronale et le métabolisme du glucose, source principale d'énergie pour le cerveau. Or, on sait que la détection des métabolites dans le cerveau, par exemple celle du proton (Cr, NAA, Lac), est rendue très difficile par la présence d'un immense pic provenant de l'eau et, selon la région étudiée, d'un pic plus petit provenant des lipides. Par conséquent, il convient de supprimer ou d'atténuer correctement ces signaux par une technique d'édition permettant de quantifier ces métabolites. Pour cela, nous proposons d'utiliser la spectrométrie RMN simple voxel localisée qui consiste à acquérir le spectre provenant d'un unique petit volume bien défini et positionné à un endroit précis de l'échantillon étudié. Les métabolites observables en SRM pourront éventuellement être détectés dans les structures biologiques à des concentrations de l'ordre de la micro-mole/litre. La quantification est faite en utilisant le logiciel jMRUI (quantification AMARES), (Wanhamme *et al.*, 1997 ; Naressi *et al.*, 2001) et le logiciel TopSpin (Bruker NMR data acquisition and processing Software).

Nous avons montré dans nos articles précédents (Fakri-Bouchet *et al.*, 2006 ; 2007 et 2008) que les micro-antennes sont des outils d'investigation qui permettent une bonne localisation, vérifiée par IRM, ainsi qu'une reproductibilité satisfaisante au cours d'analyses effectuées *in vitro*.

Le travail rapporté dans cet article est la mise au point d'un nouveau concept de micro-capteurs radiofréquence fabriqués à l'aide de techniques de micro-électronique (Fakri-Bouchet *et al.*, 2006), utilisé pour l'étude SRM d'échantillons de faibles volumes et de faibles concentrations. Les paramètres pris en considération dans le choix de ces micro-antennes et établis comme figure de mérite (Lacey *et al.*, 1999) sont : le rapport signal sur bruit ramené à la concentration en $[mM^{-1}]$, $S_c = SNR/C$, et défini comme sensibilité en fonction de la concentration, la sensibilité en fonction de la masse définie par $S_m = SNR/mol$ (mol : moles de l'échantillon). Les limites de détection définies par $LOD_c = 3/S_c$, $LOD_m = 3/S_m$ et leurs valeurs normalisées par rapport au temps d'acquisition $nLOD_c$ et $nLOD_m$.

Le but de cette étude et la comparaison des performances de cette nouvelle génération de micro-antennes avec celles des capteurs RMN classiques (Antennes de surface). Les résultats obtenus démontrent que ces micro-capteurs offrent un gain en sensibilité supérieur à celui des antennes de surface d'un facteur de 2,4. Ainsi, ces micro-antennes RMN associées à des techniques d'édition de spectroscopie localisée permettront une nouvelle approche pour l'analyse d'échantillons de faibles concentrations et de faibles volumes.

2. Matériels et Méthodes

2.1.1. Installation d'imagerie et de spectroscopie RMN

Les expérimentations en imagerie et en spectroscopie RMN, ont été réalisées sur un système Bruker 4,7T avec des gradients de 270 mT/m et une ouverture de 10 cm. L'émission est assurée à l'aide d'une antenne type cage d'oiseau (Rapid Biomedical, $\varnothing=6,9$ cm). La réception est réalisée à l'aide d'une micro-antenne planaire ou d'une antenne de surface commerciale. Le découplage entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice est de type actif, commandé par la console Bruker (Fakri-Bouchet *et al.*, 2006).

2.1.2. Séquences de spectroscopie

Les expérimentations ont été réalisées à l'aide de la séquence de spectroscopie localisée PRESS (*Point RESolved Spectroscopie*). PRESS est une séquence utilisant la technique de localisation mono-voxel fondée sur l'écho de spins. Les acquisitions ont été effectuées en 4096 points complexes, (256 accumulations, TR=5 s, TE=20 ms, taille du voxel $1.5*1.5*1.5$ mm³, temps d'acquisition 21 minutes). La suppression du signal de l'eau est réalisée à l'aide de la séquence VAPOR (Variable pulse power and optimized relaxation delays).

2.1.3. Quantification

La quantification des données obtenues par spectroscopie RMN se fait à l'aide du logiciel jMRUI : logiciel développé dans notre laboratoire et distribué à travers le monde (<http://www.mrui.uab.es/mrui/>), ce logiciel utilise des éléments de «connaissance *a priori* » (positions spectrales notamment) des signaux qui seront analysés.

Les signaux recueillis respectivement par les deux antennes réceptrices (la micro-antenne et l'antenne de surface) ont été traités dans le domaine temporel pour la suppression des composantes résiduelles de l'eau avec un algorithme de décomposition en valeurs singulières Hankel-Lanczos (HLSVD, jMRUI) (Vanhamm *et al.*, 1997). Après traitement ces signaux ont été quantifiés à partir des « connaissances *a priori* » sur les signaux à analyser en utilisant la méthode AMARES du jMRUI (Stefan *et al.*, Meas. Sci. Technol, 2009) et aussi en utilisant le progiciel d'acquisition TopSpin (Bruker).

Les limites de détection ont été calculées pour chaque métabolite, les valeurs de S_c , S_m , LOD_c , LOD_m , $nLOD_c$ et $nLOD_m$ sont présentées dans le Tableau 1.

3. Description des antennes utilisée

3.1 Micro-capteurs implantables

La micro-antenne utilisée est de type planaires de géométrie ellipsoïdale constituée de 4 spires de 22 μm de large et 20 μm d'espace inter spires, la plus grande spire mesure 500 μm de large pour 1000 μm de long Figure 1 (a). Elles sont prolongées par des pistes de 10 mm de long permettant une implantation en profondeur. Cette antenne repose sur un substrat en verre, le tout formant une sorte d'aiguille de section carrée suffisamment faible pour ne pas causer, lors de l'implantation, de lésions cérébrales trop importantes

Le matériau utilisé pour la fabrication de micro-antennes est du silicium type n de 520 millimètres d'épaisseur, avec une couche d'oxyde SiO_2 de 1 μm assurant l'isolation électrique. Des couches de graine de Cu de 200 nm et 20 nm de Ti sont déposées par la pulvérisation constituant ainsi une structure métallique plane de quelques micromètres d'épaisseur (Sorli et al., 2006). La plaquette de silicium est ensuite découpée pour former des antennes « aiguille » de 1 cm de long.

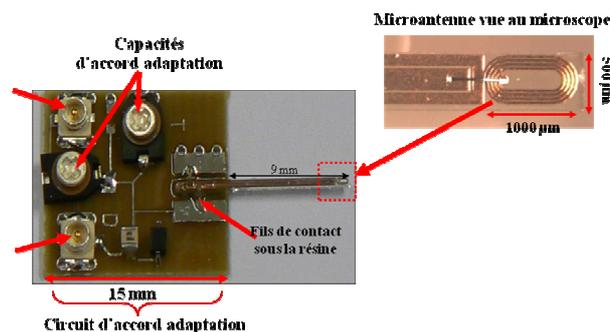


Figure 1 : (a) 4 spires constituant la bobine de surface, partie active de la micro-antenne ; (b) Micro-capteur configuration implantable avec le circuit d'accord et d'adaptation.

L'antenne est montée sur un circuit d'accord/adaptation Figure 1(b), particulièrement compact afin d'être compatible avec ce que peut supporter un petit animal. Ce circuit comporte des capacités d'accord et d'adaptation (50Ω) en technologie CMS assurant le fonctionnement de l'antenne à 200 MHz ainsi que des prises coaxiales au format SMB.

Les caractéristiques électromagnétiques de la micro-antenne ont été mesurés sur un analyseur HP 4195A, indiquant pour le facteur de qualité $Q = 24$, pour l'inductance $L = 7,5\text{nH}$ et pour la résistance $R = 0,62\Omega$.

Dans la pratique, la micro-antenne est utilisée uniquement en réception, l'émission est effectuée à l'aide d'une antenne volumique « cage d'oiseau » associée à un système électronique de découplage actif à l'aide d'une diode PIN selon le montage Figure 2.

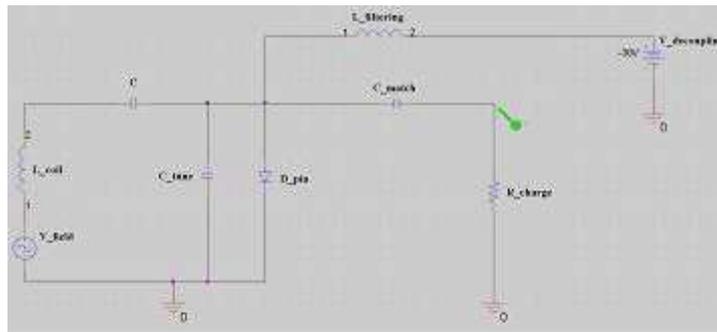


Figure 2 : Schéma électrique équivalent de la micro-antenne utilisée en réception avec son circuit électronique de découplage actif.

Le schéma Figure 2, est un schéma électrique équivalent de la micro-antenne RMN en réception avec un découplage fondé sur l'utilisation d'une diode PIN. En fonction de la tension de commande appliquée à cette diode, la micro-antenne fonctionne selon deux modes : découplée pendant l'excitation RF, réception ensuite.

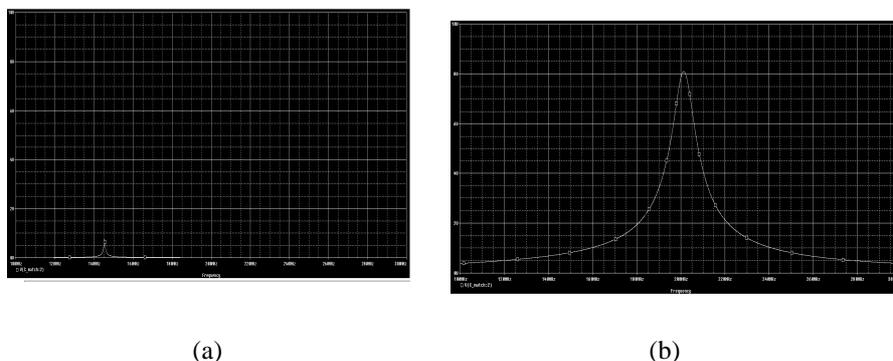


Figure 3 : La micro-antenne fonctionnant en mode découplage (a), en mode réception (b).

Découplage Figure 3(a) : A l'émission la micro-antenne est commandé à l'aide d'une tension de +3,8V, qui assure la conduction de la diode, qui court-circuite le condensateur d'accord et induit le désaccord de la micro-antenne, laquelle voit son signal atténué et sa fréquence d'accord déviée vers les basses fréquences (145MHz) au lieu de 200 MHz, fréquence de résonance du proton à 4,7 teslas.

Réception Figure 3(b): en réception la diode est commandée par une tension de commande de -30V, par conséquent la diode est bloquée et l'antenne est accordée à la fréquence de travail et elle peut détecter le signal utile en provenance de l'échantillon.

3.2 Antenne de surface

L'antenne de surface utilisée est une antenne commerciale (RAPID-Biomédical) pour le proton ^1H , ($\Phi= 4.2\text{cm}$), dédiée à l'imagerie et la spectroscopie de cerveau de rat.

Cette antenne fonctionne aussi en réception uniquement, elle est associée à un préamplificateur faible bruit et est équipée du même circuit de découplage actif à base de diode PIN que la micro-antenne.



Figure 4 : Photographie de l'antenne de surface RAPID-Biomédical (<http://www.rapidbiomed.de/>).

4. Protocole de l'étude comparative

Les expériences de SRM sont réalisées sur deux fantômes, adaptés pour chaque type d'antenne Figure 5.

Les deux antennes sont employées avec les mêmes conditions expérimentales (Mode réception uniquement, accord, adaptation), seule l'antenne de surface possède un préamplificateur intégré.

La reproductibilité des mesures a été établie en utilisant cinq prototypes micro-antennes pour l'analyse du même échantillon.

La micro-antenne (partie aiguille), est immergée dans un tube contenant la solution de 10 métabolites cérébraux,

L'antenne de surface a été posée sur un fantôme (fait maison) dont les dimensions se rapprochent de celle du cerveau de rat.

Pour chaque antenne, un même voxel, de dimensions $1.5*1.5*1.5 \text{ mm}^3$, a été sélectionné par la séquence PRESS. Ce voxel a été placé à une profondeur de 9 mm afin de simuler la situation *in vivo*.

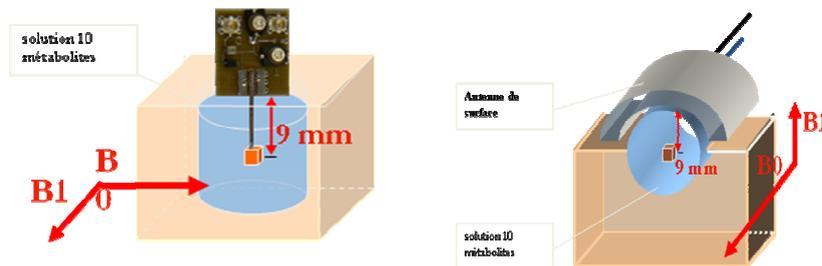


Figure 5 : (a) Micro-antenne (partie aiguille) immergée dans un tube contenant la solution des métabolites cérébraux, (b) antenne de surface (RAPID-Biomédical).

5. Résultats

La sensibilité spectrale de la micro-antenne a été déterminée en utilisant une solution de 10 métabolites du proton (^1H) observables dans le cerveau humain : choline (Cho), lactate (Lac), acide gamma-aminobutyric (GABA), N-Acetyl Aspartate (NAA), Glutamine(Gln), Glutamate(Glu), myo-Inositol(m-Ins), Aspartate(Asp), avec différentes concentrations $c=100, 50, 25$ mM, Figure 6.

Les expérimentations ont été réalisées à l'aide de la séquence de spectroscopie localisée PRESS pour permettre de sélectionner la région d'intérêt en regard avec la partie active de la micro-antenne.

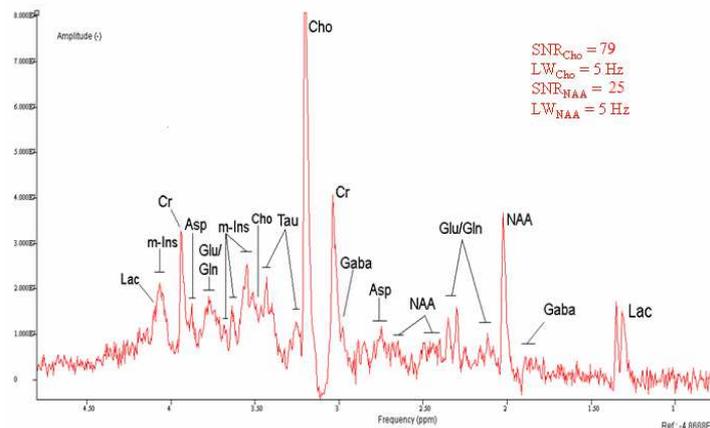


Figure 6 : Spectre 1H de 10 métabolites cérébraux avec une concentration fixée à 50 mM: Lactate, Gaba, N-acétylaspartate, Glutamine, Glutamate, Aspartate, Créatine, Choline, Taurine, myo-Inositol, obtenu à 4,7T à l'aide de la séquence Press ($TR/TE = 5000/20$ ms, $N_{acc} = 256$, $T_{exp} = 20$ minutes).

A partir des calculs du rapport signal sur bruit RSB pour les différents spectres obtenus, les valeurs de sensibilités S_c , S_m ; les limites de détection LOD_c , LOD_m , $nLOD_c$ et $nLOD_m$ ont été calculées pour chaque métabolite, et comparées pour les deux types d'antennes, Tableau 1.

<i>Métabolites</i> <i>Figures de mérite</i>	Créatine 3.91ppm	Choline 3.18ppm	Créatine 3.02ppm	NAA 2ppm	Lactate 1.34ppm	Lactate 1.3ppm
$S_c [mM]^{-1}$	0.38	1.58	0.49	0.50	0.19	0.19
$S_m [nmol]^{-1}$	0.019	0.077	0.024	0.024	0.009	0.009
$LOD_c [mM]$ $N_{acc}=256$	7.82	1.89	6.10	6.04	15.82	15.40
$LOD_m [nmol]$ $N_{acc}=256$	10.12	39.20	7.9	7.8	20.5	20
$nLOD_c [mM]$	125.13	30.30	97.52	96.58	253.16	246.41
$nLOD_m [nmol]$	162	627	126	125	328	319

Tableau 1. Les valeurs des limites de détection calculées pour chaque signal à l'aide de l'algorithme AMARES du logiciel jMRU et Progiciel d'acquisition TopSpin (Bruker).

La Figure 7 montre le facteur de gain FOG calculé pour la Cho, NAA, Cr et Lac pour différentes concentrations 25, 50, 100 mM. On constate que le LOD avec l'antenne de la surface est beaucoup plus grand que celle de la micro-antenne. La valeur de FOG calculée est comprise entre 2 et 2,4.

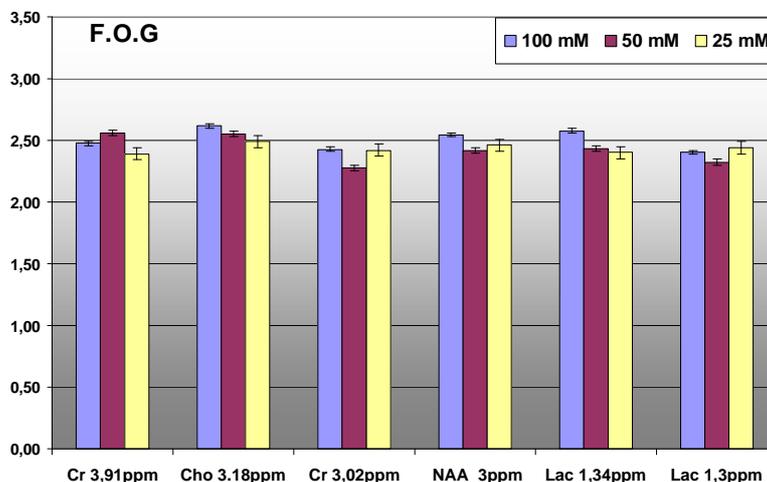


Figure 7 : le facteur de gain Cho, Cr, NAA et Lac avec concentration de 25(jaune), 50(rose), 100(bleu) mM.

6. Conclusion et Discussion

Dans cette étude comparative des performances de la micro-antenne et celle d'une antenne de surface commerciale, la configuration électronique pour les deux types d'antenne était identique (mode de fonctionnement en réception uniquement, gain à l'entrée du spectromètre, shim, fantôme). L'étude a été faite en utilisant cinq micro-antennes prototypes afin de vérifier la reproductibilité des mesures. Les valeurs de la sensibilité, LOD et FOG trouvés, montrent que malgré un volume sensible réduit, la micro-antenne présente un avantage pour détecter et analyser de faibles concentrations de métabolites dans un petit volume de l'ordre du microlitre (μl) par rapport à l'antenne de surface.

Ces premiers résultats nous permettent de valider en partie la miniaturisation de l'expérience RMN aussi bien en imagerie qu'en spectroscopie à l'aide de micro-antennes planaires. La bonne corrélation entre les valeurs calculées et mesurées des paramètres électromagnétiques de la micro-antenne étudiée valide aussi leur utilisation qui représente une avancée significative dans le domaine de la RMN. En effet, l'association de la localisation spatiale du capteur et des acquisitions par SRMN, pourrait devenir un outil prometteur, pour une approche

métabolique ou fonctionnelle de certaines lésions et pour la surveillance de certaines affections (chirurgie de l'épilepsie, tumeurs, maladie de Parkinson, Alzheimer, sclérose en plaque). Elle pourra être aussi appliquée à d'autres domaines d'exploration clinique, comme les pathologies musculaires.

Pour les perspectives d'emploi *in vivo*, une grande partie de nos applications sera orientée vers l'exploration de la fonction cérébrale *in vivo* dans son versant métabolique : métabolites du proton (Cr, NAA, Lac) et phosphorés (PCr, ATP).

Le spectre de métabolites cérébraux observables par RMN présenté sur la Figure 6, traduit les performances actuelles de la micro-antenne.

L'étude du signal effectuée par simulation de la distribution de champ radiofréquence et validée par imagerie RMN a permis de définir un volume actif d'observation de la micro-antenne de 2 μ L, cette valeur permet une localisation assez précise du « voxel » pour les investigations en spectroscopie RMN, à cette échelle.

Un intéressant exemple d'application prévu est le cas du noyau dorsal dans le cerveau de rat, où l'on pourra observer les variations de teneur tissulaire des métabolites énergétiques présents au cours des phases successives du sommeil.

La spécificité de cette étude repose sur la création d'un ensemble d'outils et méthodes entièrement originaux et ouvrant des possibilités d'exploration tissulaire par RMN biomédicale à faible échelle spatiale. Les résultats de cette étude *in vitro* augurent d'une ouverture à plus large applications biomédicales réservés à l'exploration cérébrale *in vivo*. En effet La valeur du LOD = 1.89 mM dans le cas de la choline, est relativement proche des concentrations des métabolites *in vivo* de l'ordre de 1 à 10 mM.

Bibliographie

Benington J. H., Heller H.C., « *Restoration of brain energy metabolism as the function of sleep* ». Prog. Neurobiol, 45, 1995, p. 347-360.

Eroglu S., Gimi B., Roman B., Friedman G., Magnin R. L., « *NMR Spiral Surface Micro coils : Design, Fabrication, and Imaging* », Magnetic Resonance Engineering, 17B(1), 2003, p. 1-10.

Fakri-Bouchet L., Baxan N., Rengle A., Châteaux J-F., Pasquet G., Morin P., Briguet A. « *Micro-antenne implantable pour la micro- spectroscopie RMN* » CNR IUT, 2006.

Fakri-Bouchet L., Baxan N., Rengle A., Rabeson H., Pasquet G., Châteaux J-F., Briguet A., Morin P., Graveron-Demilly D. « *Micro-Spectroscopie RMN: Limite de détection de métabolites cérébraux (~100 nL)* ». CNRIUT, Thionville 2007.

Fakri-Bouchet L., Baxan N., Kadjo A., Cespuglio R., Châteaux J-F., Morin P., Graveron-Demilly D., Briguet A.. « *Micro-antennes RMN implantables : perspectives d'étude in vivo* ». CNRIUT, Lyon 2008.

Gimi B., Eroglu S., Leoni L., Desai T. A., Magin R. L., Roman B., « *NMR Spiral*

Surface Microcoils: Application », Magnetic Resonance Engineering, Vol. 18B(1), 2003, p. 1-8.

<http://www.mrui.uab.es/mrui/>

<http://www.rapidbiomed.de/>

Lacey M. E., Subramanian R., Olson D. L., Webb A. G., Sweedler J. V., «*High-Resolution NMR Spectroscopy of sample volumes from 1 μ L to 10 μ L*», Chem. Rev. 99, 1999, p. 3133-3152.

Magin R. L., Webb A.G., Peck T. L. «*Miniature magnetic resonance machines*», IEEE spectrum 1997, p. p. 51-61

Maquet P., «*Sleep function(s)and cerebral metabolism*». Behav. Brain. Res., 69, 1995, p.75-83.

Massin C., Vincent F., Homsy A., Ehrmann K., Boero G., Besse P.A., Daridon A., Verpoorte E., De Rooij N. F., Popovic R. S., «*Planar microcoil-based microfluidic NMR probes* ». J. Magn. Reson., Volume 164, 2003, p.242-255.

Ehrmann K., Gersbach M., Pascoal P., Vincent F., Massin C., Stamou D., Besse P.-A., Vogel H., Popovic R.S., «*Sample patterning on NMR surface microcoils*». J. Magn. Reson., 178, 1, 2006, p. 96-105.

Naressi A., Couturier C., Devos J.M., Janssen M., Mangeat C., de Beer R., Graveron-Demilly D., «*Java-based graphical user interface for the MRUI quantitation package* ». MAGMA. 12, 2001,p.141-52.

Olson D. L. et al, «*Nanoliter-volume ¹H NMR detection using periodic stopped-flow capillary electrophoresis*», Anal. Chem. 71, 1999, p. 3070-3076.

Olson D. L., Norcross J. A., Johnson M., Molitor P. F., Detlefsen D. J., Wilson A., Peck T. L., «*Microflow NMR: Concepts and capabilities* ». Anal. Chem. 76, 2004, p.2966-2974.

Peck T.L., Magin R.L., Lauterbur P.C., «*Design and analysis of microcoils for NMR microscopy* ». J. Magn. Reson. B 108, 1995, p.114-24.

Schoeniger J.S., Blanckband S.J., «*The design and construction of the NMR microscope probe* ». J. Magn. Reson. B 104, 1994, p.127-34.

Stefan D., Di Cesare F., Andrasescu A., Popa E., Lazariev A., Vescovo E., Strbak O., Williams S., Starcuk Z., Cabanas M., Van Ormondt D., Graveron-Demilly D., «*Quantitation of magnetic resonance spectroscopy signals: the jMRUI software package*», Meas. Sci. Technol. Vol. 20, 2009, 9 pp.

Sorli B., Chateaux J. F., Pitaval M., Chahboune H., Fabre B., Briguet A., Morin P., «*Micro-spectrometer for NMR : analysis of small quantities in vitro*», Institute of Physics Publishing, Meas. Sci. Technol. Vol. 15, pp. 877-880, 2004. Vanhamme L, Van den Boogaart A, and Van Huffel S. «*Improved method for accurate and efficient quantification of MRS data with use of prior knowledge*». J Magn Reson 129, 1997, p.35-43.

Webb A.G., «*Micro coil nuclear magnetic resonance spectroscopy*», Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 38, 2005, p. 892-903.



Latifa Fakri-Bouchet, Maître de conférences (HDR),

63 ème section.

Nommée, depuis février 2000, à l'IUT de Lyon (centre) et au Laboratoire CREATIS-LRMN, UMR CNRS 5220, U630 INSERM, Université Lyon1, INSA de Lyon, elle assure ses enseignements

dans toutes les Formations EEA à l'IUT de Lyon ainsi qu'à l'Université Lyon 1 (Master ISM).

Les thèmes de recherche de Mme Fakri-Bouchet se situent dans le domaine de l'électronique, la microélectronique et le traitement du signal dédiés à la Résonance Magnétique Nucléaire (RMN).

En particulier, ses efforts de recherche récents consistent à mettre au point de nouveaux micro-capteurs radiofréquence implantables pour la détection de métabolites de faibles concentrations dans de très faibles volumes (micro et nano litre) dans le cadre d'applications biomédicales chez le petit animal aussi bien en imagerie qu'en spectroscopie RMN.

Aide à la Conception de Systèmes Instrumentés de Sécurité utilisant les composants sur étagère et les réseaux de fiabilité

Frédérique Bicking^{*,} & Christophe Simon^{**,***}**

* IUT Nancy Brabois – Université Henri Poincaré
Département QLIO, 2 rue du Colonel Clarenthal, 54300 Lunéville

** CRAN, Nancy-Université-CNRS, UMR 7039, 2 Rue Jean Lamour,
Vandoeuvre les Nancy

*** IUT d'Epinal Hubert CURIEN, Université de Nancy 2
Département QLIO, 7 Rue des Fusillés de la Résistance, 88010 Epinal

frederique.bicking@iutnb.uhp-nancy.fr ; christophe.simon@univ-nancy2.fr

Sections de rattachement : 61

Secteur : Secondaire

RÉSUMÉ : *Cet article propose une méthodologie de détermination de structure, d'allocation conjointe de disponibilité et de redondance des composants de systèmes instrumentés de sécurité (SIS) en utilisant des composants sur étagère. La méthodologie est basée sur l'utilisation des réseaux de fiabilité et des algorithmes génétiques pour la recherche de configurations optimales. En guise d'illustration, la méthodologie est appliquée à la conception d'un Système Instrumenté de Sécurité défini dans le document ISATR84.00.02-2002 relatif à la norme IEC 61508. Un premier exemple concerne la conception d'un SIS devant satisfaire à un niveau de SIL fixé sous contrainte de coût minimal à partir d'un choix de composants parmi les composants sur étagère et une architecture de type parallèle série. Le second exemple intègre des coûts de connexion impliquant la détermination d'une part de la structure non parallèle série et du choix de composants parmi les composants sur étagère.*

MOTS-CLÉS : *Sécurité, Aide à la Conception, Réseaux de fiabilité, Composants sur étagère (COTS), Algorithmes génétiques*

1. Introduction

L'industrie de process devient techniquement de plus en plus complexe et le potentiel de danger s'accroît en conséquence si les flux de danger ne sont pas convenablement contrôlés. Ainsi, lorsque les installations industrielles présentent

des risques potentiels pour les personnes, l'environnement ou les biens, diverses sécurités sont à mettre en œuvre. Celles-ci participent soit à la prévention en minimisant la probabilité d'apparition du risque, soit à la protection pour limiter les conséquences d'un dysfonctionnement. Les Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS) sont utilisés pour assurer la sécurité fonctionnelle des installations, *i.e.* la réduction des risques à un niveau inférieur ou égal au risque tolérable. Pour concevoir les SIS, deux normes de sécurité sont utilisées : l'IEC 61508 (IEC, 1998) et l'IEC 61511 (IEC, 2004).

La mise en œuvre des prescriptions de ces deux normes est assez difficile et les méthodes proposées dans leurs annexes doivent être utilisées avec précaution (Innal et al., 2006). Toutefois, un élément clairement établi dans le processus de conception d'un SIS est qu'il doit aboutir à la satisfaction d'un niveau d'Intégrité de Sécurité (SIL) alloué (Sallak, 2008). Le SIL exprime ainsi la réduction de risque que doit apporter un SIS au système qu'il surveille. La contrainte d'une conception de SIS est donc de satisfaire au niveau de SIL requis tout en minimisant le coût de conception, d'exploitation ... Il s'agit donc d'un problème d'optimisation où le coût doit être minimisé sous des contraintes de performance de sûreté de fonctionnement.

La littérature offre peu de développement d'outils d'aide à la conception de SIS mais un grand nombre d'articles s'intéressent à la conception optimale de systèmes d'un point de vue des paramètres de sûreté de fonctionnement. Tillman et al. (1977), Kuo et al. (2001) et Tzafestas (1980) ont publié des états de l'art sur les techniques d'optimisation de la fiabilité des systèmes. Dhillon (1999) et Misra (1986) ont proposé une liste de références sur l'allocation de la fiabilité. Yalaoui (2004) a proposé une méthode d'allocation de fiabilité pour les systèmes séries-parallèles. Levitin et al. (1999) ont proposé une procédure d'optimisation basée sur la minimisation du coût total du système en considérant les taux de défaillance et de réparation des composants, et en agissant sur la fréquence de remplacement et les actions de maintenance corrective et préventive. Castro et al. (2003) ont également présenté une méthode d'optimisation de la disponibilité basée sur l'allocation de redondance et les actions de maintenance. Elegbede et al. (2003) ont développé une méthodologie d'optimisation de la disponibilité basée sur les plans d'expérience afin de paramétrer l'algorithme génétique utilisé.

Toutes les méthodes proposées approchent le problème d'optimisation pour des systèmes dont la structure est de type parallèle-série. Dans cet article, nous présentons une approche générale de conception de SIS permettant de traiter les systèmes parallèle-série comme les systèmes à structure complexe. Nous proposons notamment la recherche de la structure de connexion des composants du SIS à concevoir en fonction des objectifs de niveau de d'intégrité de sécurité. Pour cela, nous utilisons les réseaux de fiabilité (Kaufmann et al., 1975).

De plus, dans cet article, nous intégrons une contrainte de disponibilité de stock sur les composants. Cela suggère que les composants du SIS à concevoir

sont choisis dans un ensemble discret, les composants sur étagère, disponibles ou en stock.

La section 2 de l'article est dédiée aux éléments de la norme utiles au problème de conception des SIS. La section 3 présente les réseaux de fiabilité et le calcul de la disponibilité. La section 4 concerne la méthode d'optimisation exploitée. La section 5 traite deux exemples.

2. Normes et SIS

La norme IEC 61508 (IEC, 1998) est une norme internationale qui porte plus particulièrement sur les systèmes E/E/PE (électriques/électroniques/électroniques programmables) de sécurité. La norme propose une approche opérationnelle pour mettre en place un système de sécurité E/E/PE, en partant de l'étude des exigences de sécurité (avec une définition du périmètre couvert, une analyse et une évaluation du risque) et en prenant en compte toutes les étapes du cycle de vie du système E/E/PE. Un des intérêts de cette norme est d'être générique et donc d'être applicable dans tous les secteurs où la sécurité peut être traitée avec des systèmes E/E/PE : industries manufacturières, industries des process continus, pharmaceutiques, nucléaires, ferroviaires ... La norme IEC 61508 fixe le SIL qui doit être atteint par un SIS qui réalise la Fonction Instrumentée de Sécurité (SIF) dès lors qu'une réduction de risque est nécessaire. Elle donne le SIL en fonction de sa probabilité de défaillance moyenne sur demande ($PF_{D_{avg}}$) pour les SIS faiblement sollicités (moins d'une sollicitation par an) ou en fonction de la probabilité de défaillance par heure (PFH) pour les SIS fortement sollicités ou agissant en mode continu (cf. tableau 1).

SIL	Probabilité moyenne de défaillance à la sollicitation $PF_{D_{avg}}$	Fréquence des défaillances par heure PFH
1	$[10^{-2}, 10^{-1}[$	$[10^{-6}, 10^{-5}[$
2	$[10^{-3}, 10^{-2}[$	$[10^{-7}, 10^{-6}[$
3	$[10^{-4}, 10^{-3}[$	$[10^{-8}, 10^{-7}[$
4	$[10^{-5}, 10^{-4}[$	$[10^{-9}, 10^{-8}[$

Tableau 1 : Niveau de SIL

Les méthodes usuelles de calcul du $PF_{D_{avg}}$ des SIS sont des méthodes probabilistes (IEC, 1998; IEC, 2004, Goble et al., 2005). Elles sont issues des études traditionnelles de sûreté de fonctionnement où les données de fiabilité relatives aux composants (taux de défaillance, taux de réparation ...) peuvent être connues avec plus ou moins de précision et sont validées par le retour d'expérience.

3. Réseaux de fiabilité et disponibilité

De manière générale, un graphe permet de représenter la structure et les connexions d'un ensemble complexe en exprimant les relations entre ses éléments : réseaux de communication, réseaux routiers, circuits électriques ... (Berge 1958, Cogis 2003). Les graphes constituent donc un outil de modélisation polyvalent pour une grande variété de problèmes en se ramenant à l'étude de sommets et d'arcs. Considérons un ensemble fini S et le produit $S \times S$. Soit U un sous ensemble de $S \times S$. Le couple $G = (S, U)$ est appelé un r -graphe où r est le nombre maximal d'arcs ayant même extrémité initiale et même extrémité terminale. Les éléments de S sont appelés les sommets du graphe. Les éléments de U , qui sont des couples de sommets, sont appelés les arcs du graphe. Un graphe peut aussi être décrit par sa matrice booléenne (appelée aussi matrice de connexion), c'est-à-dire par une matrice carrée dont les lignes et les colonnes correspondent aux sommets du graphe. Les éléments valent 1 ou 0 suivant que le couple de sommets correspondant appartient ou non à U .

Un réseau de fiabilité R défini sur un ensemble $e = \{e_1, e_2, \dots, e_r\}$ de composants est constitué par un graphe r -appliqué $G = (S, U)$ sans boucle, dans lequel deux sommets $O \in S$ et $Z \in S$ sont distingués et appelés respectivement "origine" et "extrémité", et une application $\Delta: U \rightarrow e$ telle que:

$$\Omega(u_j) = (S_i, S_k) \text{ et } \Delta(u_j) = (S_i, S_k) \rightarrow \Delta(u_j) \neq \Delta(u_j')$$

où Ω est l'application qui fait correspondre à chaque arc le couple de ses extrémités.

L'application Δ fait correspondre à chaque arc du graphe un composant. Ainsi, plusieurs arcs peuvent correspondre à un même composant, mais il se peut qu'un arc ne corresponde à aucun composant.

La figure 1 donne un exemple de réseau de fiabilité où : $e = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$, $S = \{O, Z, A, B, C\}$ et $U = \{(OA)_{e_2}, (OA)_{e_3}, (OB), (AB), (AZ), (BC), (BZ), (CB), (ZB)\}$.

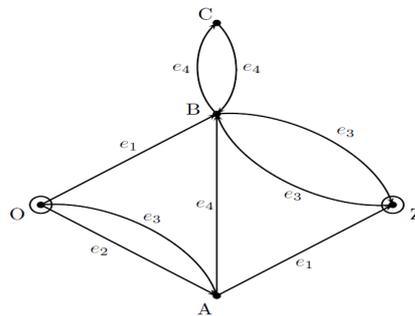


Figure 1 . Réseau de fiabilité

L'application Δ est indiquée par les e_i affectés aux arcs.

Dans un réseau de fiabilité R , un lien est un sous-ensemble de composants $a \subset e$ tel qu'il existe dans le graphe partiel $G_p(a)$ un chemin de O à Z . Ce graphe partiel étant le graphe G réduit aux arcs tel que $U_p(e_i) = \{u \in U / \Delta(u) \in e_i\}$. Une coupe d'un réseau de fiabilité R est le sous-ensemble de composants $b \subset e$ tel que le sous-ensemble d'arcs $U_p(b)$ contienne une coupe du graphe G relative à un sous-ensemble de sommets incluant Z et n'incluant pas O . A toute coupe b du réseau correspondent une ou plusieurs coupes du graphe incluses dans $U_p(b)$. Un lien a (resp. coupe b) d'un réseau de fiabilité est minimal si aucun sous-ensemble $a' \subset a$ (resp. $b' \subset b$) n'est un lien du réseau (resp. une coupe).

La disponibilité moyenne A_{avg} du SIS représenté par un réseau de fiabilité est calculée à partir des liens l_i minimaux du réseau de fiabilité. La disponibilité instantanée est définie par l'équation :

$$A(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) \quad [1]$$

où $P_i(t)$ est la disponibilité instantanée du lien minimal i et n est le nombre de liens minimaux du réseau de fiabilité. Cette équation est calculée par disjonction des termes pour tenir compte de la répétition des événements dans les liens minimaux. La disponibilité moyenne est obtenue par intégration sur le temps de fonctionnement ou le temps entre instants d'inspection ou de test du système.

4. Optimisation

La méthode d'optimisation choisie repose sur une méthode génétique en raison de son applicabilité à de nombreux problèmes et sa simplicité d'utilisation. Ces algorithmes ont une bonne efficacité dans la recherche d'un optimum global (Holland 1975; Goldberg 1994). En outre, ils ne requièrent pas de contrainte de monotonie, de dérivabilité de la fonction à optimiser. Ils présentent également l'avantage de proposer un ensemble de solutions optimales ou quasi-optimales.

Dans cet article, nous utilisons la méthode génétique précédemment élaborée par Bicking (1994) avec une définition particulière des chromosomes et des opérateurs appropriés de reproduction, combinaison et mutation. A partir d'une population initiale dont chaque individu représente une solution potentielle, on effectue itérativement des phases de sélection, de recombinaison et de mutation permettant de créer de nouveaux individus. L'adaptation d'un individu correspond à la fonction objectif du problème à optimiser. La stratégie globale est suffisamment élitiste pour éliminer les individus non adaptés (mauvaises solutions) et garder une certaine diversité pour que la population ne soit pas bloquée dans un minimum local.

Toutes les contraintes relatives à la définition d'un SIS comme par exemple son SIL, sont prises en comptes lors de la création des individus. Un individu est représenté par une chaîne de gènes représentant les paramètres du problème. Une correspondance entre ces chaînes et des matrices booléennes est déterminée pour construire les réseaux de fiabilité constituant également une représentation des solutions du problème.

Le SIS à concevoir est constitué de 3 couches, une couche de capteurs, une couche d'éléments logiques et une couche d'actionneurs. Chaque couche peut contenir de 1 à 6 composants de même type ou de type différents (figure 2). Comme le flux dans un SIS est plutôt un flux informationnel, il y a toujours au moins une liaison d'une couche à l'autre. Cependant, un composant d'une couche peut ne pas être connecté à un composant d'une couche adjacente sans que cela porte préjudice à l'accomplissement de la mission du SIS.

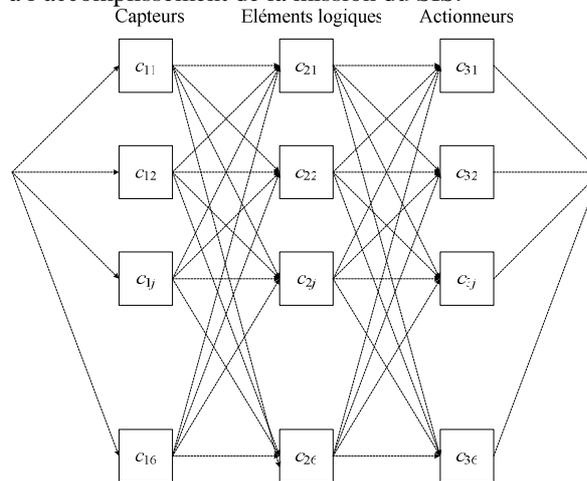


Figure 2 : Architecture en couches d'un SIS codée par
 $[c_{11}c_{12} \dots c_{16} \quad c_{21}c_{22} \dots c_{26} \quad c_{31}c_{32} \dots c_{36}]$

L'objectif est donc de trouver pour chaque couche le nombre de composants à positionner, leur type et leur connexion avec les autres composants des couches adjacentes. Les composants sont choisis parmi des références dont on connaît le coût et le taux de défaillance permettant une estimation de leur fiabilité, c'est le principe des composants sur étagère (COTS). La méthode génétique utilisée délivre un code de structure dans lequel un 0 à la position c_{ij} signifie qu'il n'y a pas de composants à la place j de la couche i . S'il y a un composant à la place c_{ij} alors le code indiqué renseigne sur son type.

5. Études numériques

Nous utilisons une application concernant un réservoir sous pression définie dans le document technique ISA-TR84.00.02-2002 (ISA 2002). Notre objectif est de concevoir un SIS pour le réservoir. Le SIL est imposé au concepteur et la demande est formulée avec un coût total minimal. En conséquence, il faut déterminer la structure du SIS, choisir les composants parmi les composants sur étagère et leur type pour chaque sous système du SIS, ainsi que les connexions entre ces composants qui permettent d'obtenir le SIL exigé avec un coût minimal. La contrainte sur le SIL exigé est transformée en une contrainte sur la disponibilité moyenne du SIS selon le tableau 1. Le problème peut être ramené à un problème de minimisation du coût global du SIS sous une contrainte de disponibilité moyenne $A_{avg} = 1 - PFD_{avg}$ du SIS calculée à partir de l'équation 1. Le coût global du SIS est la somme des coûts de ses composants intégrant les coûts d'achat et opérationnels (exploitation, maintenance, logistique, ...). Les coûts opérationnels sont évalués a priori par l'ingénieur fiabiliste à partir du retour d'expérience. En outre, nous supposons qu'il y a 6 types de composants disponibles sur le marché pour chaque sous-système du SIS. Les fiabilités aux temps d'inspection et les coûts des composants du SIS sont donnés dans le tableau 2.

Composants du SIS	Sous-systèmes					
	Capteurs		Éléments logiques		Éléments finaux	
	Coûts	Fiabilité	Coûts	Fiabilité	Coûts	Fiabilité
Type 1	21	0,961	14	0,91	25	0,90
Type 2	15	0,93	21	0,95	35	0,94
Type 3	20	0,97	12	0,93	41	0,96
Type 4	25	0,981	22	0,96	27	0,98
Type 5	45	0,99	26	0,99	28	0,97
Type 6	30	0,9775	22	0,97	31	0,99

Tableau 2 : Caractéristiques de coût et de fiabilité des composants disponibles

Les résultats obtenus lors d'essais pour un SIS de SIL 3 exigé conduit au SIS présenté figure 3a) et son réseau de fiabilité associé en 3b). Le coût obtenu est de 139 unités pour une disponibilité moyenne de 0,999114. Cette structure de SIS est un système série-parallèle codée par [022020 003330 000460] composé de :

- 3 capteurs de type 2 ($c_{12}(2)$, $c_{13}(2)$, $c_{15}(2)$)
- 3 éléments logiques de type 3 ($c_{23}(3)$, $c_{24}(3)$, $c_{25}(3)$)
- 2 actionneurs : un de type 4 ($c_{34}(4)$) et un de type 6 ($c_{35}(6)$)

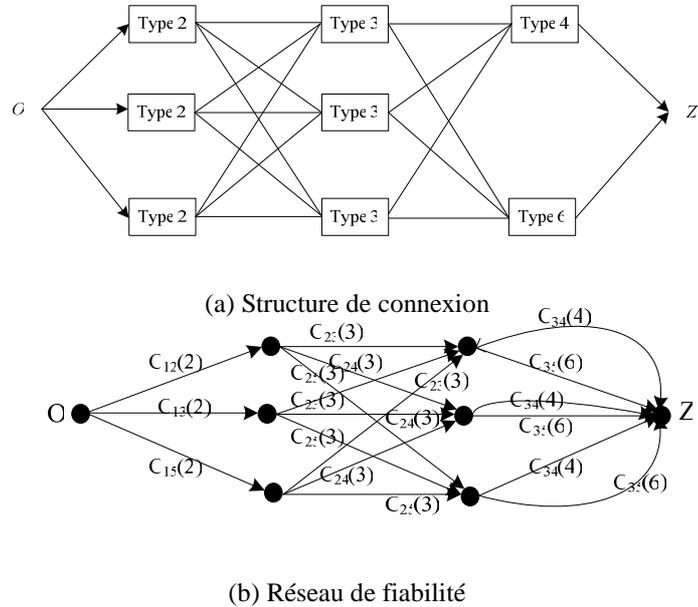


Figure 3 : SIS de SIL 3 : structure (a) et réseau de fiabilité associé (b)

Les résultats obtenus lors d'essais pour un SIS de SIL 4 exigé conduit au SIS présenté figure 4a) et son réseau de fiabilité associé en 4b). Le coût obtenu est de 184 unités pour une disponibilité moyenne de 0,9999049. Cette structure de SIS désignée par le code [032030 330330 400404] est un système série-parallèle composé de :

- 3 capteurs (type 2 et 3) ($c_{12}(3)$, $c_{13}(2)$, $c_{15}(3)$)
- 4 éléments logiques de type 3 ($c_{21}(3)$, $c_{22}(3)$, $c_{24}(3)$, $c_{25}(3)$)
- 3 actionneurs de type 4 ($c_{31}(4)$, $c_{34}(4)$, $c_{36}(4)$)

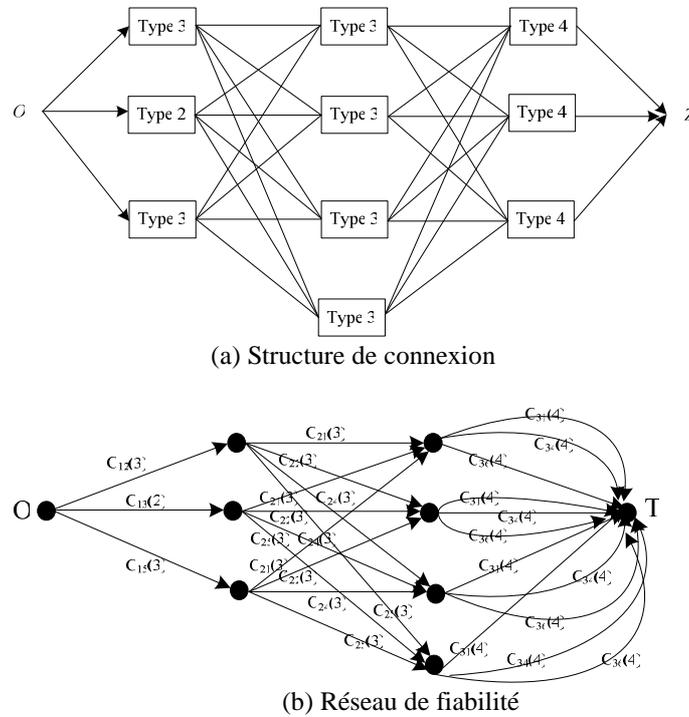


Figure 4 : SIS de SIL 4 : structure (a) et réseau de fiabilité associé (b)

D'autres configurations sont proposées grâce à la méthode génétique. Elles présentent des fiabilités légèrement plus élevées mais leur coût est également plus élevé. Un exemple d'une de ces configurations est un SIS défini par [002043 333100 400404] qui comprend 3 capteurs (types 2, 3 et 4), 4 éléments logiques (types 1 et 3) et 3 actionneurs (type 4). Le coût de ce SIS est de 191 unités et la fiabilité vaut 0,99992123. Les configurations obtenues les plus intéressantes sont résumées dans le tableau 3 :

Niveau de SIL	Code de la structure	Coût	Fiabilité
4	[202022330013400041]	189	0.999905123
4	[02003333010304004]	190	0.999902132
4	[230003031303400056]	191	0.999900132
4	[00204333310000404]	191	0.999921232

Tableau 3 : Caractéristiques de coût et de fiabilité des autres configurations proposées

Ces solutions sont d'autres alternatives pour le concepteur qui peut préférer une meilleure fiabilité à coûts légèrement plus élevés.

Ces résultats montrent que la conception de SIS par minimisation du coût et sous contrainte de fiabilité intégrant la notion de composants sur étagère est tout à fait faisable. Les résultats obtenus montrent des architectures de SIS de type série parallèle, ce qui paraît logique. On constate également que les structures de SIS incorporant de la redondance diversifiée présentent des fiabilités plus importantes et assurent indirectement une protection contre les défaillances de cause commune ce qui est en accord avec la norme IEC 61508.

Si maintenant, on intègre dans le calcul du coût, le coût des connexions entre les composants (une unité par connexion), la solution trouvée lors d'essais pour un SIS de SIL 3 exigé conduit au SIS présenté figure 5a) et son réseau de fiabilité associé en 5b). Le coût est $139+13=152$ unités. En réduisant le nombre de connexions on aboutit à une architecture de SIS qui n'est plus un système série-parallèle d'où l'intérêt d'utiliser les réseaux de fiabilité de Kaufmann. La disponibilité moyenne obtenue est de 0,999033, ce qui est légèrement plus faible que dans le cas d'une architecture série-parallèle (0,999114).

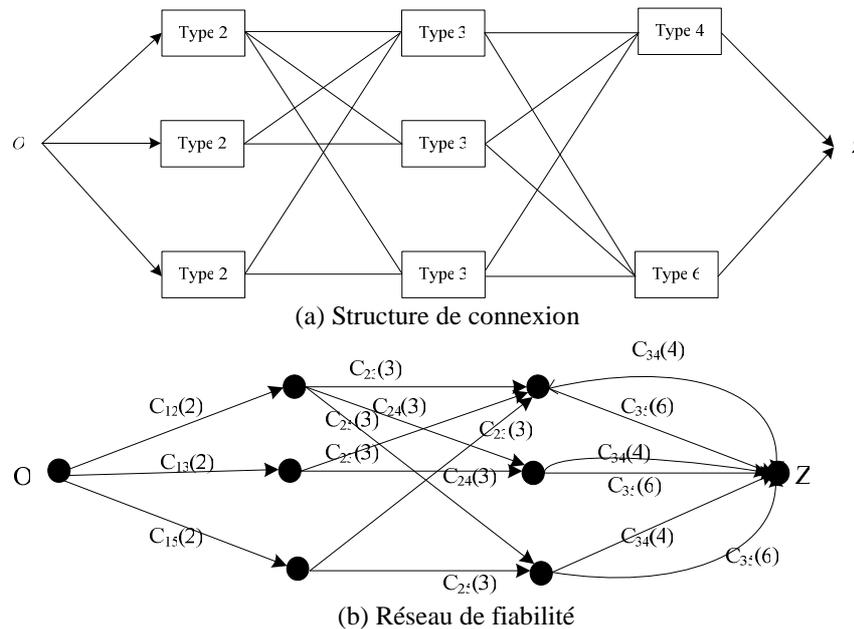
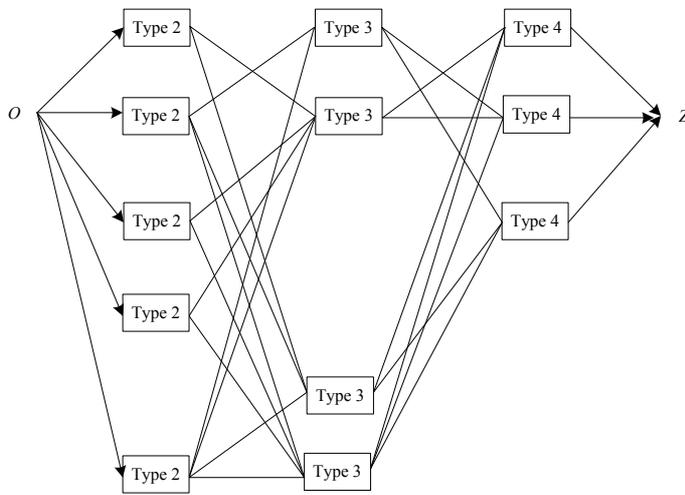
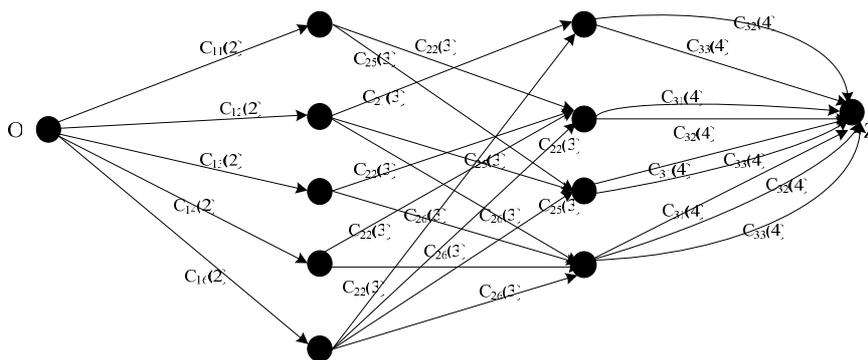


Figure 5 : SIS de SIL 3 : structure (a) et réseau de fiabilité associé (b)

Pour un SIL4 exigé, l'architecture trouvée n'est pas non plus un système série parallèle. Le SIS trouvé est présenté figure 6a) et son réseau de fiabilité associé en 6b). Le coût obtenu est de 204 unités pour une fiabilité de 0,999963. On remarquera que l'on retrouve dans cette solution une redondance non diversifiée.



(a) Structure de connexion



(b) Réseau de fiabilité

Figure 6 : SIS de SIL 4 : structure (a) et réseau de fiabilité associé (b)

6. Conclusion

Dans ce travail, nous avons proposé une méthodologie de détermination de structure, d'allocation conjointe de disponibilité et de redondance des composants de systèmes à partir de composants sur étagère qui a été ensuite appliquée à la conception des SIS devant satisfaire un niveau d'intégrité de sécurité (SIL) exigé par les normes de sécurité IEC 61508 et IEC 61511. Les résultats obtenus sont satisfaisants et les configurations trouvées montrent l'intérêt de la méthode employée par le fait de présenter plusieurs architectures possibles et donc d'offrir plus de choix aux concepteurs pour un même niveau de SIL donné. Comme perspectives à ce travail, nous pouvons citer une meilleure définition des coûts de conception du SIS en incluant les autres coûts comme la perte de production, les frais fixes d'entretien ou des coûts d'entretien variables concernant les types de composants. En ce qui concerne l'architecture du SIS, si le modèle est un système série/parallèle, l'utilisation des réseaux de fiabilité peut paraître sans intérêt. L'objectif étant de maximiser la probabilité de bon fonctionnement (fiabilité ou de disponibilité) sans contraintes de structures prédéfinies cela peut conduire à différentes architectures qui ne sont plus nécessairement série/parallèle d'où la nécessité d'avoir un outil de modélisation adapté.

Dans la même idée, la disponibilité du système peut être revisitée. Pour le moment, l'utilisation de sommation de probabilités comme une approximation est correcte, mais seulement si les sous-systèmes sont indépendants. Si une défaillance d'un sous-système ou d'un composant affecte le fonctionnement d'un autre sous-système, alors les défaillances de cause commune doivent être examinées. Une solution consiste à définir une nouvelle valeur de la probabilité de défaillance de chaque composant disponible dans le catalogue en utilisant le modèle β (Fleming, 1974). Sinon, d'autres techniques plus sophistiquées sont nécessaires pour évaluer le système. L'introduction d'autres critères de sûreté de fonctionnement ainsi que la prise en compte de la fiabilité des bus de communication dans les processus de conception des systèmes peut être envisagée.

Bibliographie

- Berge C., Théorie des graphes et ses applications, Dunod, France, 1958.
- Bicking F., Fonteix C., Corriou J.-P. et Marc I., Global optimization by artificial life: a new technique using genetic population evolution, RAIRO-Operations Research, 28(1), 1994, p. 23-36.
- Castro H. et Cavalca K., Availability optimization with genetic algorithm, International Journal of Quality and Reliability Management, 20, 2003, p. 847-863.
- Cogis O. et Robert C. Théorie des graphes : Au delà des ponts de Königsberg, Problèmes, théorèmes, algorithmes, Vuibert, 2003.

- Dhillon B., Design reliability: Fundamentals and applications, CRC Press LLC, 1999.
- Elegbede C., Chengbin C., Adjallah K. et Yalaoui F., Reliability allocation through cost minimization, IEEE Transactions on Reliability, 52, 2003, p. 106-111.
- Fleming K.N., A reliability model for common mode failures in redundant systems, Report GA-13284, General Atomic Co, 1974
- Goble W. et Cheddie H., Safety Instrumented Systems Verification- Practical Probabilistic Calculations, ISA, 2005.
- Goldberg D.E., Algorithmes génétiques Exploration optimisation et apprentissage automatique, Addison-Wesley, France, 1994.
- Holland J.H., Adaptation In Natural And Artificial Systems, University of Michigan Press, 1975.
- IEC, IEC 61508: Functional safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic (E/E/PE) safety related systems, 1998.
- IEC, IEC61511, Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector, 2004.
- Innal F., Dutuit Y. et Rauzy A., Quelques interrogations et commentaires relatifs à la norme IEC 61508, Conférence Lambda Mu 15, Lille, France, 2006.
- Kaufmann A., Grouchko D., Cruon R., Modèles mathématiques pour l'étude de la fiabilité des systèmes, Masson, Ed., 1975.
- Kuo W., Prasad V., Tillman F. et Hwang C., Optimal reliability design: fundamentals and applications, Cambridge University Press, 2001.
- Levitin G. et Lisnianski A., Joint redundancy and maintenance optimization for multi-state series-parallel systems, Reliability Engineering and System Safety, 64, 1999, p. 33-42.
- Misra K., On optimal reliability design: a review, System Science, 12, 1986, p. 5-30.
- Sallak M., Simon C. et Aubry J-F., A Fuzzy Probabilistic Approach for Determining Safety Integrity Level, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 16(1), p. 239-248, 2008.
- Tillman F., Hwang C. et Kuo W., Optimization techniques for systems reliability with redundancy, IEEE Transactions on Reliability, 26, 1977, p. 148-155.
- Tzafestas S., Optimization of system reliability: A survey of problems and techniques, International Journal System Science, 11, 1980, p. 455-486.
- Yalaoui A., Chu C. et Chatelet E., Allocation de fiabilité et de redondance. Les systèmes parallèle-série, Journal Européen des Systèmes Automatisés, 38, 2004, p. 85-102.

Modèle sûr de fonctionnement du wagon intelligent de ferroutage

Joffrey Clarhaut *, Saïd Hayat *, Blaise Conrard **, Vincent Cocquempot **

** INRETS – Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité
20, Rue Élisée Reclus-BP 317 59666 Villeneuve d'Ascq Cedex*

*** LAGIS – Université Lille 1
Equipe Sûreté de Fonctionnement des Systèmes Dynamiques
Polytech-Lille, Bâtiment D- 59650 Villeneuve d'Ascq Cedex*

*joffrey.clarhaut@inrets.fr ; said.hayat@inrets.fr ;
blaise.conrard@polytech-lille.fr ; vincent.cocquempot@univ-lille1.fr*

Sections de rattachement : 61

Secteur : Tertiaire

RÉSUMÉ : *Cet article présente le concept du wagon intelligent de ferroutage, calqué sur celui des composants intelligents, et qui permet de répondre aux besoins de sûreté de fonctionnement du système complexe de ferroutage. En effet, l'ajout de fonctionnalités au wagon permet de réduire les risques d'accidents liés au système de ferroutage induits par le transport des camions sur le wagon. Le modèle fonctionnel du wagon intelligent pour la phase de convoi ainsi que le système mixte de protection contre les incendies et les désarrimages qui pourrait être implanté sur le wagon sont également présentés dans cet article et illustrent l'intérêt de ce concept par rapport à un accident de ferroutage des années 90.*

MOTS-CLÉS : *Composant intelligent, Sûreté de fonctionnement, Wagon de ferroutage, Système embarqué de protection contre l'incendie.*

Introduction

La sécurité des systèmes de transport guidé est assurée par l'utilisation de divers systèmes qui sont considérés comme garants du niveau de sécurité du système global. La conception de ces systèmes de sécurité fait l'objet de nombreuses normes qui prescrivent précisément les conditions de conception et de test afin d'attester de leur caractère sécuritaire et du niveau de sécurité obtenu (CENELEC, 2000), (Schabe, 2002). Cependant, dans le cadre du système de ferroutage, l'absence de normes spécifiques, tenant compte des particularités de ce système, ne permet pas de déterminer les conditions de conception et de test de

ces systèmes sécuritaires (Clarhaut, 2009). Cela est dû au caractère innovant du système de ferroutage. Ce caractère innovant, associé à l'intensification prévue du ferroutage afin de réduire la congestion routière et aux accidents impliquant les systèmes de ferroutage démontrent qu'il existe un besoin d'ajouter des systèmes de protection au système actuel. Prévu dans le but de réduire les risques d'accident du système de ferroutage, l'ajout de systèmes de protection au système de ferroutage est de ce fait de plus en plus nécessaire.

La première partie de cet article présente le principe de fonctionnement du ferroutage et son développement actuel. La seconde partie de cet article identifie les différents risques liés au système de ferroutage, c'est-à-dire les différents types d'accidents pouvant intervenir. La troisième partie de cet article propose le concept du wagon intelligent, extension de la notion de composant intelligent, doté de systèmes de sécurité, lui permettant de participer plus activement à la sûreté de fonctionnement du système global de ferroutage. La présentation d'un accident de ferroutage des années 90 illustre l'intérêt de ce nouveau concept et les moyens de réduction des risques d'accidents. Le détail des fonctions de ce wagon intelligent pour la phase de convoi montre clairement les besoins en systèmes de protection embarqués. Enfin, à titre d'illustration, la présentation d'un de ces systèmes de protection qui pourrait être implanté sur le wagon est effectuée. Ce système a été conçu dans le cadre de la thèse de (Clarhaut, 2009).

Présentation du ferroutage

Principe de fonctionnement

Le ferroutage est un terme générique du fret ferroviaire, désignant l'ensemble des techniques qui permettent de charger des camions complets sur un train : tracteur routier plus remorque plus chauffeur. De nombreuses solutions techniques sont proposées : Modalhor et Eurotunnel Fret (France), RoadRailer (USA), Iron Highway (Canada), Route Roulante (Suisse), Projet Sail (Allemagne), ... Plus précisément, le ferroutage est fondé sur une Unité de Transport Intermodal (UTI), dans laquelle la marchandise est transportée de bout en bout par le mode de transport le plus approprié :

- Le mode de transport routier seulement utilisé en desserte d'extrémité (trajet initial et terminal), avec un parcours le plus court possible.
- Le mode de transport ferré pour le parcours principal.

Ce type de transport présente de nombreux avantages comme la réduction de la congestion routière en délestant le réseau routier d'une partie du trafic de camions, la diminution du nombre d'accidents routiers mortels impliquant des camions, la baisse de la pollution ou encore la baisse de la consommation en carburant.

Un système en plein développement en France

Malgré ses atouts, le taux de pénétration du ferroutage reste faible (la part modale en tonnes-kilomètres comparativement à la route est de l'ordre de 7% en 2005). Afin de concurrencer le transport routier en termes de compétitivité, ce système doit se développer. Pour cela, de nombreux projets dits "d'Autoroute Ferroviaire" (terme désignant les projets Français de lignes ferroviaires par ferroutage comme les projets Atlantique et Magistrale Eco-Fret présentés sur la figure 1) sont en cours de réalisation et impliqueront une augmentation importante du trafic par ferroutage.

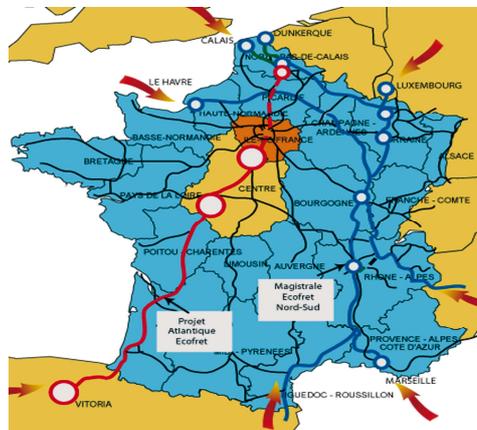


Figure 2 . Lignes de ferroutage du projet « Eco-Fret »

Les systèmes de ferroutage utilisés actuellement nécessiteront d'avoir une disponibilité et un niveau de sécurité élevés afin de pouvoir répondre à cette augmentation de trafic tout en conciliant les besoins liés à la sécurité ferroviaire. Nous allons préciser, dans la seconde partie, les risques liés au système de ferroutage. Cette présentation des risques et des besoins en découlant permettra d'introduire le concept du wagon intelligent répondant à ces besoins.

Les risques liés au système de ferroutage

Les risques généraux des systèmes ferroviaires

Une classification des risques généraux existants dans les systèmes ferroviaires a été proposée par (Hadj-Mabrouk et al., 1998). Cette classification distingue quatre catégories d'accidents :

- Les *accidents utilisateur* sont associés aux dommages causés à un ou plusieurs utilisateurs (usagers et/ou opérateurs) du système alors qu'aucun

problème de fonctionnement du système ne soit survenu, et qu'aucune action de cet ou ces utilisateurs n'ait été constatée.

- Les *accidents système* sont associés aux dommages causés au système et aux utilisateurs lors d'un accident initié par le système lui-même (incendie, déraillement ...).

- Les *accidents utilisateur/système* sont associés aux dommages causés à un ou plusieurs utilisateurs du système, lors d'une action effectuée par ce ou ces utilisateurs durant le fonctionnement normal du système.

- Les *accidents environnement/système* sont associés aux dommages causés au système et aux utilisateurs lors de conditions environnementales particulières (catastrophes naturelles ...).

Les risques généraux dépendent également du type de transport guidé considéré (transport de voyageurs ou de marchandises). Pour le transport de marchandises et pour le ferroutage, ce sont principalement des risques matériels qui engendrent des risques humains (par exemple dans le cas d'un déraillement d'un transport de marchandises dangereuses pouvant affecter la population proche du lieu de l'accident).

Les risques spécifiques liés au ferroutage

Comme nous venons de le voir, les risques liés au ferroutage sont principalement des risques liés au matériel roulant. (Beugin, 2006) spécifie que ces risques sont relatifs à :

- l'état du matériel roulant. Ces risques concernent les défaillances et détériorations du matériel survenant en exploitation selon le vieillissement des équipements (défaillance du système de freinage, d'un chevalet d'arrimage ...) et, selon le vieillissement et la robustesse des structures mécaniques (rupture d'essieu ...).

- certains problèmes dans la conception des composants et des équipements, des sous-systèmes, ..., susceptibles d'être à l'origine de défaillances peuvent entraîner la défaillance du système de sécurité embarqué et générer des risques supplémentaires pour le système de transport.

Dans le cadre du ferroutage, à ces risques matériels liés au matériel roulant s'ajoute une classe de risques liée au matériel transporté. En effet le camion, non conçu initialement pour être transporté par un train, possède des caractéristiques physiques propres (Pneus, réservoir, moteur, amortisseurs, produit transporté entre autres) très différents d'une charge classique (un conteneur). Ainsi, le camion peut être mal fixé au wagon, son produit transporté peut avoir été mal réparti (entraînant des vibrations du camion), s'échapper de son conteneur (fuite), le tracteur routier peut présenter des fuites au niveau de son réservoir de carburant, du moteur (fuite d'huile), de ses pneus (dégonflement), avoir un problème sur son système de freinage ou sur ses amortisseurs. Tous ces risques liés au matériel transporté peuvent entraîner un incendie ou un désarrimage du camion et/ou de sa remorque. Ces particularités entraînent des besoins en

systèmes de sécurité supplémentaires pour le système de ferroutage permettant de détecter ces événements redoutés (déraillement, collision, incendie, désarrimage). À ces besoins sécuritaires s'ajoutent les besoins en termes de disponibilité afin de rendre attractif le ferroutage.

Les besoins

Les besoins en termes de disponibilité que le ferroutage doit rendre sont nombreux s'il veut être envisagé comme un mode de transport complémentaire à la route. Ces besoins sont principalement liés à sa complexité du système de ferroutage. En effet, le système de ferroutage faisant partie des systèmes de transport ferroviaire s'appréhende comme un système complexe et cela pour plusieurs raisons (Clarhaut et al., 2006) :

- Par l'hétérogénéité des différents acteurs en présence. Nous avons en interaction des véhicules routiers, des trains et une infrastructure ferroviaire.
- Par l'hétérogénéité des matières transportées principalement liée à ses caractéristiques physiques (matières dangereuses ou périssables, variations du poids entre deux véhicules).
- Par l'existence de plusieurs phases de fonctionnement (chargement, convoi).
- Par la variabilité dynamique de son environnement (traversée de tunnels, de ponts et de villes).

Ces raisons impliquent les besoins sécuritaires suivants :

- Pour le système de ferroutage : garantir la sécurité, la disponibilité et fiabilité du train et du wagon.
- Pour le chargement : surveiller les risques potentiels liés à la charge et au wagon lors des opérations de chargement et de transport (équilibre de la charge, fixation de la remorque, fuite de carburant, incendie, sur-échauffement des freins), protéger la marchandise transportée et le tracteur routier.
- Pour l'environnement immédiat : réduire les conséquences d'accidents de ferroutage sur les infrastructures environnantes.

L'existence de ces besoins spécifiques impose la définition et la conception d'un système d'automatisation sûr adapté au ferroutage. Ce système d'automatisation sûr est défini par le concept du wagon intelligent de ferroutage.

Le concept du wagon intelligent de ferroutage

Le système de ferroutage actuel comprend plusieurs acteurs multifonctionnels (véhicules routiers, wagons et infrastructure). Dans les systèmes actuels de ferroutage, le wagon joue un rôle passif du point de vue de la sûreté de fonctionnement. En effet, ce wagon ne possède ni énergie embarquée, ni capteurs, ni actionneurs permettant d'analyser et de déterminer un éventuel risque lié à ce système. Les constructeurs ferroviaires justifient l'absence d'équipements afin de limiter au maximum la tare du wagon (poids à vide) et augmenter le ratio de productivité pour les transporteurs routiers. L'ajout d'intelligence au wagon à

l'aide de fonctions supplémentaires embarquées permettrait de contribuer activement à l'amélioration du niveau de sûreté de fonctionnement global de l'ensemble du système de feroutage dans toutes ses phases de fonctionnement mais en diminuant obligatoirement le ratio de productivité.

En effet, le wagon est le seul acteur du système de feroutage présent dans toutes les phases de fonctionnement du système complexe. Par ailleurs, le wagon permet de faire le lien entre les deux autres acteurs du système c'est-à-dire avec les véhicules routiers et avec l'infrastructure ferroviaire. Afin d'étayer ces propos, nous allons présenter l'intérêt du concept du wagon intelligent en analysant un accident de feroutage.

L'accident de l'Iron-Highway CP-121-13 (Canada)

Le 13 août 1997, une remorque routière transportée à bord du train CP-121-13 s'est désarrimée et s'est mise en porte-à-faux sur la plate-forme qui la portait, excédant la largeur du wagon. Pendant que le train roulait sous un passage supérieur aménagé pour une route, cette remorque a heurté les colonnes d'appuis du pont. La remorque a subi des dommages considérables, et il a fallu fermer le passage supérieur pendant plusieurs jours car plusieurs colonnes du pont ont été endommagées. Cependant, aucune marchandise dangereuse n'a été mise en cause et personne n'a été blessé (BST, 1999).

La remorque s'est désarrimée à cause d'un chevalet d'arrimage de la remorque défectueux rendant le mécanisme de verrouillage inopérant et ne pouvant être détectée visuellement par les opérateurs lors du chargement.

L'intérêt du concept du wagon intelligent s'expose aisément avec cet accident. En effet, l'ajout d'un système permettant de surveiller l'arrimage de la charge aurait permis de détecter plusieurs paramètres utiles relatifs aux mouvements de la charge (sa position par rapport au wagon et/ou son accélération transversale par exemple). Même si les opérateurs ne pouvaient détecter l'inaction du chevalet d'arrimage, la surveillance des deux paramètres cités précédemment aurait aidé à détecter la mise en porte-à-faux de la remorque sur le wagon et aurait pu permettre de prévenir les opérateurs afin d'éviter l'accident et les dommages en résultant.

La réduction des risques par le wagon intelligent

Les accidents par feroutage sont heureusement rares, cependant, du fait des matières transportées et de l'environnement traversé (tunnels, villes ...), une défaillance peut entraîner d'importantes conséquences sur le système ferroviaire et sur son environnement. C'est pourquoi le système de feroutage doit intégrer de nouvelles fonctions permettant de répondre aux exigences de sécurité, de fiabilité et de disponibilité. L'ajout de telles fonctions implique la définition d'un système dit « intelligent » sûr de fonctionnement pour le wagon de feroutage et implique l'introduction des équipements suivants sur le wagon :

- Des fonctions logicielles permettant de remplir des missions de surveillance, commande, communication, ... (Attouche et al., 2001).
- Une instrumentation adaptée composée de capteurs matériels et d'instruments intelligents afin de récupérer les variables physiques nécessaires aux fonctions logicielles précédentes (Staroswieki et al., 1996).
- Des redondances matérielles et logicielles afin de rendre le système tolérant aux défaillances (Conrard et al., 2006).

Ces équipements supplémentaires vont constituer le système d'automatisation du wagon de ferroutage et doivent pouvoir répondre aux besoins de sûreté de fonctionnement du système de ferroutage.

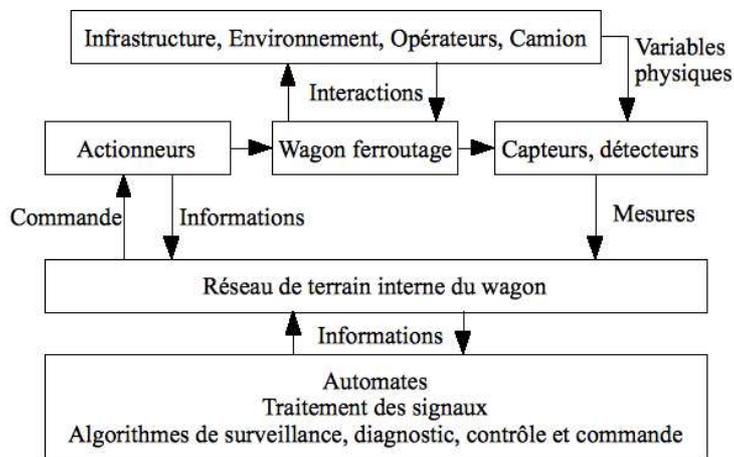


Figure 3 . Modèle du wagon intelligent

D'après la figure 2 qui présente le modèle du wagon intelligent, celui-ci est équipé d'unités de traitement (automates, régulateurs, calculateurs) accomplissant des traitements logiciels afin d'effectuer ses missions (surveillance, diagnostic ...). Le wagon intelligent est également équipé d'un réseau de terrain reliant les unités de traitement aux capteurs et aux actionneurs placés sur sa structure. Ce réseau permet de transmettre des commandes à destination des actionneurs et de récupérer les informations issues des actionneurs (accomplissement d'une commande) ainsi que les mesures générées par les capteurs. Ces mesures sont obtenues à partir de variables physiques issues de l'environnement proche du wagon (infrastructure, opérateurs, camions).

Afin de concevoir ce système intelligent, il est d'abord nécessaire de déterminer l'ensemble des fonctions qu'il doit rendre et cela dans toutes ses phases de fonctionnement. Cette identification passe par une analyse fonctionnelle dont

l'ensemble des résultats est présenté dans (Clarhaut, 2009). La figure 3 présente l'arbre fonctionnel détaillant les fonctions supplémentaires du wagon intelligent. Cet arbre caractérise les fonctions du wagon pendant la phase de convoi. Cette phase de convoi étant définie temporellement depuis l'ordre de départ du train d'une gare jusqu'à son arrivée dans la gare suivante.

Le détail des fonctions illustrées par la figure 3 est le suivant :

- F1 : Détecter un défaut d'arrimage de la charge sur le wagon : cette fonction vérifie l'adéquation entre le wagon et la charge. Elle surveille l'état du système d'arrimage et les mouvements de la charge (modification du centre de gravité, basculement sur un côté, mise en

QuickTime™ et un
décompresseur BMP
sont requis pour visionner cette image.

porte-à-faux ...).

Figure 4 . Arbre fonctionnel du wagon intelligent pour la phase de convoi

- F2 : Surveiller l'intégrité physique de la charge : cette fonction permet au système intelligent de vérifier les informations importantes de la charge.

Ces informations regroupent l'état de la matière transportée (température, poids par exemple) mais également l'état de la remorque routière et de son tracteur (système pneumatique, pression des pneus ...).

- F3 : Alimenter le système intelligent en énergie : cette fonction permet au système d'être alimenté sur le wagon et de détecter une anomalie dans son système de distribution d'énergie. Ces énergies étant pneumatiques, hydrauliques et électriques.
- F4 : Transmettre des informations : cette fonction fait appel à l'ensemble des matériels d'émission et de logiciels de communication pour émettre des messages vers les opérateurs ou les automatismes. Certains messages sont directement émissibles (signaux visuels, sonores ...) alors que d'autres nécessitent un système d'interprétation, de codage et de vérification. Ces messages sont informatifs (fin de mouvement d'un actionneur, disponibilité du wagon, début du blocage de la charge ...) tandis que d'autres ont pour objet de prévenir d'une défaillance (fuite détectée, température anormale ...).
- F5 : Recevoir des informations de l'infrastructure : cette fonction permet au système de recevoir des informations des automatismes extérieurs et de les comprendre. Ces informations peuvent être des requêtes (demande de passage dans un autre mode d'utilisation ...) et / ou des données (température des tunnels, images provenant de capteurs en avant du convoi ou sur le convoi, ...).
- F6 : Surveiller les paramètres physiques du wagon : cette fonction vérifie les données importantes du wagon pendant la phase de convoi (température des freins, des roues de bogie et de la boîte d'essieu, accélération horizontale ...).
- F7 : Recevoir les alarmes d'autres wagons : cette fonction permet au système de recevoir des informations des autres wagons du convoi et de les relayer vers les opérateurs. Ces informations sont principalement des données (température de la charge, défaillance détectée sur le wagon numéro j par exemple).

À partir de ce modèle fonctionnel, les systèmes matériels permettant de remplir ces fonctions ont été déterminés avec une méthode d'optimisation multicritères du type « branch and bound » (D'ariano et al., 2006). En effet, il s'agit d'obtenir des systèmes ayant le meilleur niveau de sûreté de fonctionnement à faible coût financier. Ainsi, dans la section suivante, un système de protection permettant de remplir les fonctions F1 et F2 de la figure 3 est présenté.

Exemple de système de protection du wagon intelligent

QuickTime™ et un
décompresseur BMP
sont requis pour visionner cette image.

Figure 4 . Architecture matérielle d'un système de protection

Comme il a été vu précédemment, par rapport à un système conventionnel les risques liés au matériel transporté par ferroutage augmentent les probabilités de désarrimage et/ou de déclenchement d'un incendie. L'accident de l'Iron Highway de 1997 est un exemple. Il est donc impératif de détecter au plus tôt les incendies et/ou les désarrimages. La figure 4 présente une architecture matérielle obtenue pour le système de protection remplissant les fonctions F1 et F2 du wagon pendant la phase de convoi et qui a été déterminée à l'aide de la méthodologie de conception présentée dans (Clarhaut, 2009). Ce système de protection se compose de deux systèmes de détection, d'un système de commande et d'un système d'alimentation. Tous ces systèmes sont embarqués sur le wagon.

Le système de détection d'un incendie comprend un détecteur de fumée et d'un détecteur de température. Ce système détecte la fumée puis la température. Le système de détection d'un désarrimage comprend une partie qui détecte les mouvements transversaux et une autre partie qui détecte les mouvements longitudinaux. Chaque partie est composée d'un détecteur d'accélération et de deux capteurs de positions. Comme pour le système de détection d'incendie, ce système détecte l'accélération changeante de la remorque puis son changement de position. Le système de commande comprend deux automates en redondance active qui traitent les données issues des détecteurs et qui informent les opérateurs du système (conducteur du train, poste de contrôle commande) par l'intermédiaire de la fonction F4 de la figure 3. Enfin, le système d'alimentation est composé de deux alimentations en redondance passive (l'alimentation n°2 se met en service quand l'alimentation n°1 devient défectueuse).

Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté les concepts généraux du ferroutage ainsi que le concept du wagon intelligent permettant d'améliorer la sûreté de fonctionnement globale du ferroutage. La première partie a présenté le ferroutage ainsi que les besoins particuliers pour le développement de ce système. La seconde partie a mis en évidence les différents risques existant dans les systèmes de transport guidés ainsi que les risques particuliers liés au ferroutage. Les besoins en systèmes de sécurité pour le système de ferroutage découlant de ces risques ont ensuite été présentés. Enfin, la troisième partie a présenté le concept du wagon intelligent permettant de réduire l'ensemble des risques liés à la fois au matériel de transport ainsi que ceux liés au matériel transporté. Les accidents de ferroutage montrent que le niveau de sécurité du système actuel est insuffisant pour répondre à l'intensification future du trafic. Le modèle fonctionnel du wagon pour la phase de convoi a été détaillé afin de présenter les fonctions supplémentaires nécessaires. Issu de ce modèle fonctionnel, un système de protection contre l'incendie et contre le désarrimage a été plus particulièrement détaillé. C'est l'un des systèmes qui montrent l'intérêt du concept du wagon intelligent par rapport à l'accident ferroviaire de 1997 et qui a été présenté dans (Clarhaut et al., 2008).

Bibliographie

Atouche S., Hayat S., Staroswiecki M., « An efficient algorithm for the design of fault tolerant multi-sensors systems », Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (CDC01), 2001.

Beugin J., Contribution à l'évaluation de la sécurité des systèmes complexes de transport guidé, Thèse de doctorat, 20 décembre 2006, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.

Bureau Sécurité et Transport du Canada (BST), « Collision contre un passage supérieur routier survenue le 13 août 1997 près de Bedell (Ontario) », train numéro CP 121-13. Rapport technique numéro R97H0008 du BST, 1999.

CENELEC, « NF EN 50126, Applications ferroviaires : spécification et démonstration de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité (FDMS) », CENELEC, Comité Européen de Normalisation Electrotechnique, Fontenay aux roses, France, UTE, Union Technique de l'Electricité et de la communication, 2000.

Clarhaut J., Prise en compte des séquences de défaillances pour la conception de systèmes d'automatisation, Application au ferroutage, Thèse de doctorat, 23 mars 2009, Université de Lille.

Clarhaut J., Hayat S., Conrard B., Cocquempot, V., « Safety intelligent system conception for piggyback service », IEEE ICIT International Conference on Industrial Technology, Vol. N°6, 2006, p. 1659-1664.

Clarhaut J., Hayat S., Conrard B., Cocquempot, V., « Méthodologie de conception de systèmes sûrs et économiques utilisant les scénarios de défaillances », Actes du 16ème

Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de fonctionnement (LambdaMu 16), Avignon, N°8-B3, 2008, p. 1-8.

Conrard B., Bayart M. « Design of dependable control system thanks to a semi-quantitative optimisation » Proceedings of Safety and Reliability for Managing Risk, Estoril, 18-22 septembre, 2006, p. 1583-1589.

D'ariano A., Pacciarelli D., M. Pranzo, « A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network », European Journal of Operational Research, Science Direct Ed., N°183-2, pages 643–657, 2006.

Hadj-Mabrouk H., Stuparu A., Bied-Charreton D., « Exemple de typologie d'accidents dans le domaine des transports guidés », Revue générale des chemins de fer, mars 1998, p. 17-55.

Schabe H., « The safety philosophy behind the cenelec railway standards », Actes ESREL 2002 European safety and reliability conference, Lyon, 2002.

Staroswieki M., Bayart M., « Models and languages for the interoperability of smart instruments », Automatica, N°32-6, 1996, p. 859-873.



Joffrey Clarhaut a reçu le diplôme d'ingénieur de Polytech'Lille en France en 2004 et le doctorat en automatique et informatique de l'Université de Lille 1 (France) en mars 2009. Il est actuellement chercheur à l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS). Ses intérêts de recherches actuels concernent l'évaluation sûre de fonctionnement de systèmes complexes, particulièrement pendant la phase de conception du système avec un intérêt pour les systèmes de transport.



Blaise Conrard a reçu le diplôme d'ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences et Technologies de l'Ingénieur de Nancy, en France, en 1994, et le doctorat en automatique de l'Université Henri Poincaré Nancy 1 en 1999. Il est actuellement Maître de conférences à l'Université de Lille 1, en France, au sein du Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal depuis 2000. Ses intérêts de recherche portent sur la fiabilité et la conception de systèmes d'automatisation.



Saïd Hayat a obtenu son doctorat en 1990 à l'Université de Lille1, France. Il a reçu son HDR en Physique en 1998 à l'Université de Lille 1 (France). Il est spécialisé dans les applications d'intelligence artificielle et d'informatique pour les systèmes de transport. Il est chargé de recherches à l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS). Il est auteur ou co-auteur de plusieurs articles dans des revues, des communications dans des congrès internationaux, et des rapports de recherche en relation avec l'industrie. Saïd Hayat est un chef de file dans divers projets nationaux relatifs à la sécurité et aux aspects opérationnels pour les systèmes ferroviaires. Il est membre d'EURNEX, « réseau ferroviaire européen de recherche de l'excellence ». Il a été impliqué dans différents projets européens (SAMNET et SAMRAIL).



Vincent Cocquempot a reçu le doctorat en automatique de l'Université de Lille des Sciences et des Technologies, en 1993. Il est actuellement Professeur en automatique et informatique à l'Institut Universitaire de Technologies de Lille, France. Il est chercheur au sein du LAGIS-CNRS UMR 8146, Université de Lille1, France. Ses intérêts de recherche portent sur le diagnostic de pannes en ligne pour les systèmes dynamiques non linéaires et sur la détection et l'isolation de fautes (FDI) pour les systèmes dynamiques hybrides et la conception de systèmes sûrs.

Trampoline : un support pour le développement d'applications temps réel

Jean-Luc Béchenec *, Mikaël Briday **, Sébastien Faucou **, Pierre Molinaro *, Yvon Trinquet ****

Laboratoire IRCCyN (UMR CNRS)

1, rue de la Noë

44321 Nantes Cedex 3

** CNRS*

*** IUT de Nantes - Université de Nantes*

**** École Centrale de Nantes*

prenom.nom@irccyn.ec-nantes.fr

Sections de rattachement : 61

Secteur :

RÉSUMÉ : *Cet article présente une chaîne de développement logiciel, pour les systèmes embarqués temps réel, s'appuyant sur le standard OSEK/VDX de l'automobile. L'article a pour objectif de montrer comment des développements effectués dans le contexte recherche ont pu être réutilisés pour l'enseignement en IUT GEII, suite à l'évolution du Programme Pédagogique National il y a quelques années. La suite d'outils permet à partir d'une conception initiale d'architecture logicielle sous forme de tâches et d'ISR de mettre en œuvre l'application temps réel à l'aide de seulement deux fichiers : l'un pour décrire l'architecture applicative par description des objets (tâches, ISRs, alarmes, événements ...) en langage standard OIL, l'autre pour décrire les actions algorithmiques des tâches et ISRs en langage C. Diverses implémentations de l'exécutif temps réel permettent de travailler sur cible microcontrôleur (C167, ARM7, MPC565, H12, AVR ...) ou bien sur cible Posix. L'ensemble de la chaîne est disponible sous forme de logiciel libre.*

MOTS-CLÉS : *systèmes embarqués, temps réel, OSEK.*

1. Introduction

Un système informatique temps réel est un système pour lequel les résultats produits ne doivent pas seulement être corrects en valeur mais également en temps, c'est-à-dire que le système doit respecter les contraintes temporelles spécifiées dans le cahier des charges. Un tel système est toujours en couplage fort avec son environnement et les contraintes temporelles peuvent s'exprimer sous diverses formes : temps de réponse à une sollicitation de l'environnement (simple, de bout en bout), contraintes de débit à respecter (en entrée ou en sortie). Les applications sont considérables et vont du contrôle d'une centrale électrique à la gestion des protocoles dans un objet communicant, en passant par les calculateurs embarqués dans une automobile ou encore les calculateurs de bord d'un avion.

L'analyse du cahier des charges d'une application conduit au recensement des actions élémentaires que doit effectuer le système de pilotage et que l'on regroupe en « tâches ». Ainsi une tâche rassemble des fonctions de l'application qui sont exécutées dans les mêmes conditions événementielles. La spécification du comportement de l'ensemble des tâches coopérantes, sous forme d'une architecture logicielle, est naturelle et lisible si on l'exprime sous formes d'actions parallèles, mais ce parallélisme d'expression repose sur l'hypothèse implicite que chaque traitement est réalisé sur un processeur dédié, ce qui ne sera pas forcément vrai à l'exécution.

On trouve dans l'architecture des variables d'entrées/sorties représentant des éléments physiques du procédé accessibles via les capteurs/actionneurs (niveau mesuré, commande de vanne), des liens de coopération entre les tâches ou entre les tâches et l'environnement (liens d'activation, de synchronisation, de communication). En laissant de côté les techniques de co-design (conception conjointe du matériel et du logiciel) on peut considérer, que l'implémentation d'une application passe par le choix de la configuration matérielle sur laquelle seront implantées les tâches de l'application, ce qui peut conduire à un système centralisé monoprocesseur (ou multiprocesseur), ou bien à un système réparti. Ce choix est complexe et est guidé par de multiples contraintes.

En ce qui concerne l'implémentation de l'architecture logicielle celle-ci est également étroitement conditionnée par un choix majeur : celui de la réalisation du « lien entre les tâches et leurs événements actifs » qui peut conduire à deux techniques différentes relevant de deux principes fondamentaux : l'approche « synchrone » et l'approche « asynchrone ».

La démarche synchrone a été à l'origine du développement de langages et environnements de développement pour les systèmes temps réel, comme par exemple [BER 87]. Elle n'est pas utilisée dans ce papier. La technique de mise en œuvre asynchrone consiste à observer en permanence les occurrences d'événement, y compris au cours de l'exécution des tâches. Cette démarche tient également compte des temps d'exécution des traitements. Sa mise en œuvre s'appuie sur l'utilisation d'un logiciel spécifique chargé de gérer l'exécution en pseudo parallélisme des tâches : l'exécutif temps réel ou système d'exploitation temps réel (RTOS).

L'équipe Systèmes Temps Réel (STR) de l'IRCCyN a une longue expérience de développement des systèmes d'exploitation temps réel, ce qui l'a amené à participer au travers de contrats industriels au développement de standard comme VDX (Vehicle Distributed Executive) pour les constructeurs français. Au niveau européen les industriels de l'automobile (constructeurs et équipementiers) ont conçu le standard OSEK/VDX dont l'équipe STR a produit une version Open Source, Trampoline, pour la partie système d'exploitation et le compilateur OIL. L'évolution des programmes du département GEII avec le nouveau PPN, notamment l'introduction explicite d'un module sur les « Systèmes Temps Réel » (MC-II2) nous a conduit à transférer un savoir-faire « recherche » vers la pédagogie. L'objet de cet article est de présenter quelques concepts liés au développement d'applications temps réel et l'exploitation d'une chaîne de développement dans un enseignement au niveau bac+2. Il n'est bien entendu pas possible de développer les problématiques liées aux systèmes temps réel telles que : les langage de description d'architecture, les OS temps réel, l'ordonnancement temps réel, la modélisation et la vérification des applications etc. [TRI99a], [TRI99b], [STA 04]. L'article présente en section 2 quelques concepts d'OSEK/VDX et OIL. Ils sont mis en œuvre au travers d'un exemple dans la section 3, puis la section 4 donne des informations sur les implémentations et la dynamique de dissémination.

2. Concepts d'OSEK/VDX et OIL

Au delà de son rôle premier d'ordonnancer les exécutions des tâches, et de celui de protéger l'accès aux ressources partagées, un exécutif joue un rôle centralisateur, un véritable rôle d'interface qui aiguille les événements reçus du procédé vers les tâches qui les attendent, déclenche le réveil des tâches en attente d'un délai ou d'une date de démarrage, reçoit et retransmet des signaux de synchronisation ou des données entre des tâches asynchrones. Ainsi en général, un exécutif offre des services accessibles directement par invocation dans les tâches. Ces services sont de différentes natures :

- la gestion des tâches : l'exécutif réalise tous les services qui contrôlent l'exécution des tâches comme leur activation, leur suspension, leur reprise, leur terminaison forcée ;
- la gestion des événements matériels (interruption) et de synchronisation : la synchronisation est réalisée en permettant aux tâches d'émettre ou de recevoir des signaux « internes ». L'exécutif offre pour cela des services de génération et d'attente de ces « événements logiciels » ;
- la communication de messages entre tâches : par boîtes aux lettres, via des ports d'échanges de données, ou sous forme d'appels du type client-serveur ;
- la gestion du temps : il s'agit essentiellement de permettre le réveil différé, daté ou périodique des tâches qui le sollicitent ;

- la gestion des ressources partagées, de gestion de la mémoire, de gestion des interruptions, des exceptions etc.

Le standard OSEK/VDX qui est la référence pour les applications embarquées dans le secteur automobile, implémente tout ou partie de ces concepts. Cette proposition est le fruit des travaux de constructeurs et équipementiers automobiles européens depuis 1995. OSEK a été étudié par les équipes principalement allemandes et VDX par le GIE PSA-Renault. Différents travaux ont été menés dans le cadre d'OSEK/VDX qui ont conduit à la fourniture de quatre spécifications principales [OSE] : OSEK/VDX OS : les services de base du noyau du système d'exploitation ; OSEK/VDX COM : les services pour la communication entre des nœuds d'un système réparti ou la communication locale ; OSEK/VDX NM (Network Management) : les services de gestion et de surveillance du réseau ; OSEK/VDX OIL (OSEK Implementation Language) : langage de description pour la mise en œuvre automatisée d'une application.

Seuls OSEK/VDX OS et OIL nous intéressent ici. Tous les objets de la spécification OSEK/VDX sont des objets « statiques », ce qui est naturel dans ce cadre d'application. On trouvera ci-après une description très succincte de quelques concepts de l'OS (hors communication).

2.1 La gestion des tâches

La tâche est l'agent actif de l'application. C'est une portion de code séquentiel correspondant souvent à la notion de procédure (ou fonction) dans le langage de programmation utilisé pour coder l'application. OSEK/VDX utilise deux types de tâches définis ci-après : 1- les tâches basiques sont des modules sans point bloquant. La tâche est activée, elle s'exécute puis elle doit se terminer. Elle ne possède que trois états : *suspended* (inactive), *ready* (attente du processeur), *running* (elle a le processeur) ; 2- les tâches étendues sont composées de un ou plusieurs modules séparés par des invocations de services éventuellement bloquants (WaitEvent). Le diagramme d'état possède donc un état supplémentaire : l'état *waiting*. Voici quelques exemples de services : **ActivateTask** active la tâche désignée ; **TerminateTask** termine la tâche appelante.

2.2 Ordonnancement

Les tâches possèdent une priorité utilisée pour l'ordonnancement. La valeur de priorité est statique, donc non modifiable, sauf par l'exécutif lorsqu'il met en œuvre l'algorithme « Immediate Priority Ceiling Protocol » pour la gestion des ressources (voir section 2.4). L'ordonnancement peut être : complètement non-préemptif (une tâche ne peut pas être interrompue par une tâche de priorité plus élevée), complètement préemptif, ou bien mixte (par tâche).

2.3 Synchronisation des tâches

Chaque tâche peut posséder un certain nombre d'événements pour lesquels des occurrences seront signalées par d'autres tâches (de type basique ou étendu) ou des ISRs (Interrupt Service Routine). La tâche propriétaire peut se mettre en attente (OU implicite sur la liste des événements nommés), et l'effacement de l'occurrence est à sa charge. Voici quelques exemples de services utilisables par les tâches : **SetEvent** signale une ou des occurrence(s) pour une tâche ; **WaitEvent** met la tâche appelante en attente sur le(s) événement(s) nommé(s) ; **ClearEvent** efface le ou les événement(s) désigné(s).

2.4 Partage de ressources et exclusion mutuelle

Dans un contexte où plusieurs tâches coopérantes sont en concurrence, il faut contrôler et obtenir l'accès cohérent à des ressources partagées par les tâches. OSEK/VDX assure la gestion de l'accès concurrent aux ressources partagées par le protocole *IPCP* (Immediate Priority Ceiling Protocol, version simplifiée du protocole PCP [SHA 90]), ce qui garantit la non-inversion de priorité et l'absence de blocage par usage des services **GetResource** et **ReleaseResource** « encadrant » la section critique, sous réserve d'une gestion bien ordonnée (LIFO) des prises de ressources multiples.

2.5 Les objets Alarme et Compteur

Ces objets permettent principalement le traitement de phénomènes récurrents dans le temps. Ils permettent également la mise en œuvre des chiens de garde. Le mécanisme est à deux « étages », associant les compteurs et les alarmes. Un compteur est un objet destiné à l'enregistrement de « ticks » en provenance d'un dispositif émettant des stimuli. Plusieurs alarmes peuvent être associées à un même compteur, ce qui permet de constituer facilement, par exemple, des bases de temps. À chaque alarme est associée une action, par exemple l'activation d'une tâche, ou encore la signalisation d'une occurrence d'événement. Une alarme peut être unique ou cyclique, absolue ou relative.

2.6 Prise en compte des interruptions

En réponse à une sollicitation externe se traduisant par une requête d'interruption, il y a exécution d'une routine de traitement (ISR : Interrupt Service Routine). Cette routine va interférer avec les tâches via les appels de service (sauf ceux d'attente) pour, par exemple, activer une tâche ou encore signaler l'occurrence d'un événement.

2.7 Le langage OIL

Le langage OIL (OSEK Implementation Language) est un langage textuel de description d'une architecture logicielle pour un calculateur. Il décrit tous les éléments qui constituent une application et leurs relations, par exemple : les tâches et leurs attributs, les ressources partagées, les alarmes et compteurs, etc. Le langage sera illustré au travers de l'exemple de la section suivante.

3. Utilisation pratique

Dans cette section, nous allons présenter un exemple concret d'utilisation de Trampoline tel qu'il peut être utilisé dans un contexte d'enseignement.

Considérons une application relativement simple, basée sur l'exécution de 2 tâches périodiques. Chaque tâche allume une diode LED lors de son activation (pour avoir un retour visuel) et met une sortie logique à 1 (pour l'exploitation à l'oscilloscope). Le code « utile » de la tâche est ensuite simulé par une boucle d'attente active, puis la sortie logique est remise à 0 et la LED est éteinte. Les caractéristiques des tâches sont définies statiquement (priorité et périodicité).

Pour mettre en pratique cette application simple, la première étape consiste à définir un diagramme de contexte de l'application. Dans notre cas, le système est très simple car il admet 4 sorties (logique et Led) et aucune entrée, il n'est donc pas représenté ici.

Un diagramme représentant l'architecture fonctionnelle de l'application est ensuite réalisé. Il permet de distinguer directement quels sont les différents objets OSEK qui seront utilisés, ainsi que les dépendances éventuelles entre les tâches, les conflits d'accès sur les variables ou ressources matérielles.

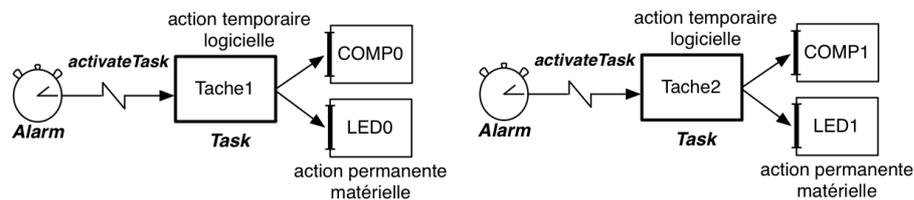


Figure 1 : Structure fonctionnelle

Sur la figure 1, les structures fonctionnelles des tâches sont données, les 2 tâches étant fonctionnellement identiques. Un rectangle représente soit une action logicielle temporaire (tâche), soit une action matérielle (périphérique); dans ce dernier cas, le trait est plus fin. Les flèches indiquent le sens du transfert de données, en l'occurrence ici des tâches vers les périphériques. Le dessin du réveil représente l'objet ALARM d'OSEK, objet qui est requis pour activer une tâche périodique. Enfin, le trait en zigzag sert à représenter une action sur la tâche (ici une activation).

Dans le contexte OSEK/VDX, une tâche périodique utilise une alarme ainsi qu'un compteur. Pour une utilisation simple en TP, nous avons configuré Trampoline de manière à ce qu'un **timer**, engendrant une impulsion à chaque milliseconde, soit automatiquement associé à un compteur. Comme il n'y a pas d'appel système relatif au compteur, il n'apparaît pas dans le diagramme fonctionnel.

À partir de cette structure fonctionnelle, la traduction dans le langage OIL est relativement rapide, car les différents objets OIL apparaissent déjà dans le diagramme fonctionnel⁷. OIL est un langage relativement simple permettant de décrire les différents paramètres des objets OSEK, basée sur des associations clé/valeur. Quelquefois, une clé peut être associée à un sous attribut. Seul le code OIL relatif à la tâche 1 est indiqué ici :

```
COUNTER General_counter {
    TICKSPERBASE = 1;
    MAXALLOWEDVALUE = 65535;
    MINCYCLE = 1;
};

TASK Tache1 {
    PRIORITY = 5;
    AUTOSTART = FALSE;
};

ALARM Active_Tache1 {
    COUNTER = General_counter;
    ACTION = ACTIVATETASK {
        TASK = Tache1;
    };
    AUTOSTART = TRUE {
        ALARMTIME = 1;
        CYCLETIME = 5;
        APPMODE=std;
    };
};
```

Le compilateur **Goil**, développé également dans le cadre du projet Trampoline, génère de manière automatique les structures de données internes propres à Trampoline, par compilation du fichier OIL de l'architecture. Il effectue aussi un certain nombre de vérifications sémantiques et d'optimisations (partage de piles pour les tâches de même priorité, optimisation de la taille des structures de données, ...).

⁷ Certains paramètres sont définis globalement dans une autre partie du fichier OIL et ne sont donc pas indiqués ici.

Il ne reste à ce stade plus que la réalisation du corps de chaque tâche en C :

```

TASK(Tache1) {
    volatile int i;
    COMP0 = 0; LED0 = 0;
    for (i=0; i<6700; i++);
    LED0 = 1; COMP0 = 1;
    TerminateTask();
}

int main(void) {
    initES();
    StartOS(OSDEFAULTAPPMODE);
}

```

Seul le code de la tâche 1, de type basique, est décrit ici. On notera l'utilisation de l'appel système **TerminateTask()** à la fin de l'exécution de la tâche.

À partir d'un exemple simple, nous avons ici introduit les différentes étapes qui constituent la conception et le codage d'une application temps réel simple en se basant sur OIL et OSEK/OS. Cette approche est suffisamment simple pour être prise en main très rapidement par les étudiants. Au niveau pratique, il est possible, par exemple ici, d'observer le fait que la tâche de plus faible priorité est décalée dans le temps, car les 2 tâches sont réveillées en même temps. D'autre part, en modifiant les priorités et les temps d'exécution, il est possible de mettre en évidence les préemptions à l'oscilloscope et de mesurer les temps de commutations de tâches, ...

4. Dissémination

Le développement de Trampoline [IRC] a été commencé initialement avec un objectif de recherche, mais l'intérêt pour des retombées en enseignement est rapidement apparu. En effet, son utilisation s'intègre naturellement dans le cadre du module complémentaire MC-II2 qui introduit la notion de « Systèmes multitâches, systèmes temps réel » dans le cadre de la formation GEII à l'IUT (Programme Pédagogique National).

Depuis, Trampoline a gagné en maturité et est actuellement utilisé dans différents établissements de formation (IUT de Nantes, Licence Pro à Nantes et Rennes, écoles d'ingénieurs ESEO à Angers et INSA à Toulouse, Master EMARO à Nantes). On peut notamment remarquer qu'il est utilisé à différents niveaux de formation car il est aisé de moduler la difficulté des travaux pratiques en intervenant sur le niveau de conception demandée.

Trampoline a été développé dès le départ en dissociant la partie du code spécifique à une architecture de la partie générique. Il est ainsi relativement aisé de le « porter » sur une nouvelle cible. Les cibles embarquées actuelles sont l'*ARM7* (Arm), l'*AVR* (Atmel), le *H8300h* (Hitachi), *S12X* (Freescale), *PowerPC 565* (Freescale), *C167* (Infineon) et le *V850e* (Nec).

De plus, une autre cible est proposée sur un système *POSIX* (Linux, MacOSX, ...). En utilisant cette cible, Trampoline est exécuté dans un *processus* Unix. Un

autre processus est alors utilisé pour émuler l'envoi d'interruptions matérielles et ainsi permettre l'utilisation de *timers*. Le fonctionnement de cet émulateur est décrit dans [BÉC 06].

En se basant sur l'approche *POSIX* abordée dans le précédent paragraphe, une version enrichie est également proposée, basée sur *ViPER* (Virtual Platform and Environment Runtime), également développé à l'IRCCyN. *ViPER* permet d'utiliser les techniques de *Software in the loop* durant le développement d'une application basée sur Trampoline (para-virtualisation). Le modèle matériel est facilement adaptable (scripts) et permet la simulation d'une application distribuée (intégrant un bus de communication entre différents nœuds). Cette approche est précisément décrite dans [BÉC10].

Au niveau recherche, le développement de Trampoline s'intègre dans le cadre des projets O4A puis O4A phase 2 *Open for Autosar*⁸). Dans ce cadre, Trampoline est intégré dans l'offre Autosar de la PME Geensys et la PME Kereval intervient au niveau des tests fonctionnels. Ces projets sont soutenus par le pôle de compétitivité « Id4CAR » des régions Pays de la Loire et Bretagne.

Il est également utilisé au LAAS et en partenariat avec Renault sur des travaux concernant la robustesse des systèmes embarqués, ainsi que dans la société Trialog dans le cadre du projet ANR Scarlet.

Trampoline est développé sous un modèle logiciel libre, avec une double licence BSD/LGPL. Ceci permet notamment à des tierces parties de participer à l'effort collectif, notamment par des nouveaux portages et des corrections directes grâce au caractère du logiciel à code source ouvert. Il est disponible sur le site de l'équipe STR de l'IRCCyN [IRC].

5. Conclusion

Nous avons développé *Trampoline*, une implémentation *libre* du standard OSEK/ VDX, un standard de système d'exploitation Temps Réel. Développé initialement pour des besoins de recherches, il est peu à peu utilisé dans l'enseignement supérieur, à tout niveau.

Après avoir abordé brièvement les grandes lignes de ce standard, nous avons donné un exemple d'utilisation pratique, en mettant l'accent sur la facilité de mise en œuvre en utilisant le langage OIL, permettant de décrire l'application OSEK. Il s'intègre ainsi naturellement dans le cadre du nouveau Programme Pédagogique National en IUT-GEII au niveau du module MCII2 dans le volume horaire prévu (30h).

Trampoline est téléchargeable sur <http://trampoline.rts-software.org>.

⁸ Autosar (AUTomotive Open System ARchitecture) est un standard pour l'ensemble de l'architecture logicielle qui intègre une extension d'OSEK pour le logiciel de base.

Références

- [BÉC 06] BÉCHENNEC J.-L., BRIDAY M., FAUCOU S., TRINQUET Y., «Trampoline An Open Source Implementation of the OSEK/VDX RTOS Specification», Emerging Technologies and Factory Automation - ETFA'06, 2006.
- [BÉC10] BÉCHENNEC J.-L., BRIDAY M., FAUCOU S., PAVIN F., JUIF F., «ViPER :a light-weight approach to the simulation of distributed and embedded software», 3rd International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems, SimuTools 2010, March 2010.
- [BER 87] BERRY G., COURONNE T., GONTHIER G., « Programmation synchrone des systèmes réactifs : le langage Esterel », TSI, vol. 6, n° 4, 1987, p. 305-316.
- [IRC] IRCCYN, «Trampoline - OpenSource RTOS project», <http://trampoline.rts-software.org>.
- [OSE] « OSEK/VDX Operating System Specification. OSEK Group. », <http://www.osek-vdx.org>.
- [SHA 90] SHA L., RAJKUMAR R., LEHOCSKY J.-P., « Priority Inheritance Protocols ; an Approach to Real-Time Synchronisation », IEEE Trans. on Computers, vol. 39, n° 9, 1990, p. 1175-1185.
- [STA 04] STANKOVIC J., RAJKUMAR R., « Real-Time Operating Systems », The Journal of Real-Time Systems, vol. 28, n° 2/3, 2004, p. 237-253.
- [TRI99a] TRINQUET Y., ELLOY J.-P., «Systèmes d'exploitation temps réel : exemples d'exécutifs industriels », chapitre Traité "Contrôle et Mesures" R8 052, Techniques de l'Ingénieur, 1999.
- [TRI99b] TRINQUET Y., ELLOY J.-P., «Systèmes d'exploitation temps réel : les principes», chapitre Traité "Contrôle et Mesures" R8 050, Techniques de l'Ingénieur, 1999.



Jean-Luc Béchenec est chercheur CNRS et travaille à l'IRCCyN (Institut de Recherche en Communication et en Cybernétique de Nantes) depuis 2000. Les systèmes temps-réel sont son domaine de recherche et plus particulièrement la simulation et les systèmes d'exploitation temps-réel. Il a obtenu sa thèse en 1989 et effectué sa recherche dans le domaine de l'architecture des ordinateurs (séquentielle et parallèle) au LRI (Université Paris-Sud) de 1990 à 2000.

Simulation des processus moléculaires à la surface de la glace.

Cas de la photodissociation de la molécule HCl.

Stéphane Briquez^{(*)()}, Maurice Monnerville^(**), Brigitte Pouilly^{(*)(**)}, Céline Toubin^(**), Sylvain Woittequand^(***).**

** IUTA – Université Lille 1-Département Mesures Physiques
Boulevard Langevin-BP 179 59653 621 Villeneuve d'Ascq Cedex*

*** Laboratoire PhLAM –UMR CNRS 8523- Bat P5bis- Université Lille 1
59655 Villeneuve d'Ascq Cedex*

**** LIC- Gorlaeus Laboratoria
Universiteit Leiden- Postbus 9502-2300 RA Leiden (Pays-bas)*

Stephane.briquez@univ-lille1.fr

Sections de rattachement : 30

Secteur : Secondaire

RESUME : *La dynamique, la réactivité chimique et la photochimie de petites molécules à la surface des particules de glace présentes dans les nuages jouent un rôle fondamental dans l'évolution de la composition chimique de l'atmosphère. Nous étudions théoriquement ces processus au niveau moléculaire par différentes méthodes numériques. Dans cet article, nous présentons à titre d'exemple le cas de la photodissociation d'une molécule HCl adsorbée à la surface de la glace.*

MOTS-CLÉS : *surface de glace, interactions moléculaires, photodissociation, paquet d'ondes quantiques, HCl.*

1. Introduction

La glace joue un rôle primordial dans l'évolution de la composition chimique de l'atmosphère (Abatt,2003). On la retrouve notamment au sein des nuages polaires stratosphériques (PSC, de l'anglais Polar Stratospheric Clouds), qui se forment à une altitude de environ 10 à 50 km et une température comprise entre 190 et 250 K. Ces PSC peuvent être constitués d'un mélange cristallin ou liquide d'acide nitrique ou sulfurique et de glace (PSC de type I) ou être essentiellement constitués de glace (PSC II). À plus basse altitude, environ 10-12 km, la glace est un des composants principaux des cirrus dans la haute troposphère (températures de 215- 220 K), en coexistence avec des gouttelettes d'eau liquide (on parle alors de nuages mixtes).

L'intérêt pour la glace et notamment son interaction avec des molécules polluantes s'est beaucoup accru depuis la découverte de la disparition saisonnière de l'ozone au-dessus de l'Arctique. M. J. Molina, prix Nobel de chimie en 1995, a proposé (Molina et al., 1987) que la surface de la glace des PSC catalyse des réactions entre des molécules halogénées (dérivées des chlorofluorocarbones, dont l'usage est interdit depuis 1987). Les molécules formées sont ensuite photodissociées sous l'effet du rayonnement solaire et produisent des radicaux actifs (principalement le chlore et le brome) qui rentrent dans le cycle de destruction de l'ozone. Au niveau de la troposphère, l'intérêt porte sur les polluants gazeux solubles comme l'acide nitrique ou des composés organiques volatils comme les acides organiques, les alcools et le formaldéhyde. Ces polluants sont capturés par les gouttelettes qui gèlent à plus haute altitude et transportés dans la haute troposphère où ils peuvent participer aux cycles de formation/destruction d'ozone.

D'une manière générale, l'impact de ces nuages sur la chimie atmosphérique reste encore mal quantifié, et il apparaît nécessaire d'avoir une meilleure caractérisation des mécanismes fondamentaux à l'origine de la chimie hétérogène

à la surface de la glace et d'étudier comment la glace influence la physico-chimie et la photochimie des différents composés dans l'atmosphère.

Cet article comporte trois parties. Dans la première partie, nous décrivons le type de glace présente dans l'atmosphère ainsi que les différents processus pouvant se dérouler à sa surface. Dans la deuxième, nous présentons succinctement les méthodes permettant de simuler la dynamique de systèmes moléculaires. Enfin, nous donnons, à titre d'illustration, les résultats obtenus pour la simulation du processus de photodissociation d'une molécule de HCl adsorbée à la surface de la glace.

2. Structure de la glace et processus dynamiques à sa surface

2.1 Structure de la glace

La glace présente plus de onze variétés cristallines et existe également sous forme amorphe (Petrenko et al, 1999). La forme cristalline hexagonale Ih est la plus présente dans l'atmosphère. Le réseau de liaisons hydrogène intermoléculaires confère une grande stabilité à la glace hexagonale (Figure 1). Cette structure peut exister sous deux types d'arrangements : « proton-ordered » ou « proton-disordered » suivant que les atomes d'hydrogène des molécules d'eau sont répartis de manière périodique dans le cristal ou non (Woittequand, 2007).

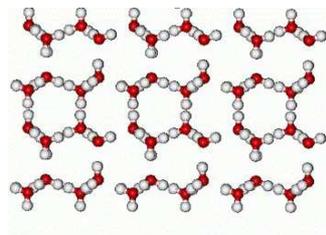


Figure 1 : Vue de « côté » d'une surface de glace hexagonale Ih de type « proton ordered ».

2.2 Interaction molécule-surface.

Lorsqu'une molécule entre en interaction avec une surface, celle-ci peut être piégée à la surface de la glace : on dit qu'elle est adsorbée. Dans le cas où il

s'établit une liaison chimique entre la molécule et la surface, c'est-à-dire qu'il y a un transfert d'électrons de l'un à l'autre, on parle de chimisorption. Lorsque la molécule reste intacte ou lorsque sa structure électronique est peu perturbée par la présence de la surface, on parle de physisorption. Une molécule adsorbée peut diffuser en surface, avant éventuellement de désorber (la molécule repart en phase gazeuse), elle peut également diffuser vers l'intérieur de la glace. La molécule peut aussi « rencontrer » une autre molécule sur la surface et réagir avec elle, on parle alors de chimie hétérogène. Enfin, la molécule peut, sous l'effet d'un rayonnement électromagnétique, ultraviolet notamment, se photodissocier (se scinder en fragments atomiques ou moléculaires).

3. Modélisation d'un système moléculaire et de sa dynamique.

Un système moléculaire est un ensemble de noyaux et d'électrons qui interagissent par le biais d'interactions d'origine électromagnétique. S'intéresser aux phénomènes dynamiques à l'échelle de la molécule requiert donc d'étudier le mouvement des noyaux et/ ou des électrons. Dans le cas général, les mouvements des électrons et des noyaux sont couplés, mais très souvent, considérant que la dynamique des électrons est beaucoup plus rapide que celui des noyaux, l'approximation de Born Oppenheimer permet de traiter séparément le mouvement des électrons et des noyaux. Le problème électronique est l'objet des méthodes de chimie quantique (Rivail, 1989) qui ne seront pas exposées ici. On se focalisera sur la dynamique nucléaire et plus particulièrement sur les méthodes quantiques dépendantes du temps.

En mécanique quantique, un système est représenté par sa fonction d'onde, et la dynamique temporelle du système est décrite par l'équation de Schrödinger dépendante du temps (Cohen-Tannoudji et al, 2007). La solution de cette équation de Schrödinger peut s'écrire formellement :

$$\Phi(\vec{r}, t + \Delta t) = \exp(-i\hbar^{-1} \cdot \Delta t \cdot \hat{H}) \Phi(\vec{r}, t) \quad [1]$$

où \hat{H} est l'opérateur Hamiltonien du système, somme de l'opérateur cinétique et de l'opérateur énergie potentielle d'interaction. $\Phi(\vec{r}, t)$ est la fonction d'onde à l'instant t . Cette expression traduit la propagation de proche en proche, c'est-à-dire par pas de temps (Δt), de la fonction d'onde représentative du système considéré. La fonction d'onde est décrite à l'aide d'un paquet d'ondes quantiques (POQ), c'est-à-dire par exemple une superposition d'ondes planes. Pour la propagation du POQ, les termes de l'équation 1 sont évalués numériquement par discrétisation sur une grille de points. Les détails techniques de ces méthodes dites de grille dépassent le cadre de cet article, et le lecteur intéressé trouvera plusieurs algorithmes de propagation dans la littérature (Balakrishnan et al, 1993; Cerjan, 1997).

La mémoire numérique nécessaire augmente de manière exponentielle avec le nombre de degrés de liberté et de points de grille. Dans le cas de systèmes à plus de 3 degrés de liberté, il peut donc être nécessaire d'avoir recours à des méthodes quantiques dépendantes du temps approchées qui permettent de traiter des systèmes plus complexes (Beck et al, 2000).

4. Illustration : photodissociation de HCl adsorbée à la surface

Nous considérons ici l'influence du rayonnement sur le processus d'interaction gaz/glace. Notre intérêt s'est d'abord porté sur l'étude de molécules simples (HCl, HF) adsorbées sur une surface de glace avant d'aborder ensuite des systèmes plus complexes. La photodissociation de HCl à la surface de la glace a aussi été étudiée très récemment par deux groupes d'expérimentateurs, un au Japon (Yabushita et al, 2007) l'autre en République Tchèque (Poterya et al, 2007).

4.1 Processus de photodissociation

La photodissociation est la fragmentation d'une molécule après l'absorption d'un ou plusieurs photons (Schinke, 1993). Dans le cas d'un processus direct, la molécule AB est portée dans un état excité dissociatif et les fragments A et B se repoussent immédiatement après excitation. Ce type de dissociation est très rapide. Dans le cas de la molécule HCl, la molécule après excitation, est portée de l'état fondamental $x^1\Sigma^+$ dans l'état excité $A^1\Pi$ purement dissociatif (Figure 2).

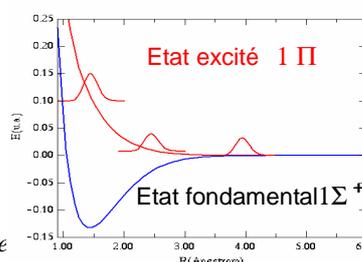


Figure 2 : Énergie E (eV) en fonction de la distance internucléaire R (Angstrom) de la molécule de HCl en phase gazeuse.

4.2 Description du système et modélisation

Dans notre étude, nous avons considéré une glace « proton ordered » figée et parfaitement ordonnée ($T=0$ K). Le chlore étant 37 fois plus lourd que l'hydrogène, celui-ci a été fixé et seule la dynamique du fragment H est traitée. Dans un premier temps, nous avons restreint la dynamique au plan (X, Z) contenant l'axe de la molécule HCl adsorbée et la normale à la surface (X parallèle et Z perpendiculaire à la surface).

Le traitement de la dynamique requiert d'abord la détermination des surfaces de potentiel du système. Ici, 3 contributions apparaissent : l'interaction intramoléculaire de HCl, l'interaction entre HCl et les molécules d'eau de la glace et l'interaction entre les molécules d'eau de la glace.

Pour plus de détails sur les différents termes d'interaction et les paramètres utilisés, on pourra se reporter aux références suivantes (Stone, 2002; Woittequand et al 2005 ; Woittequand 2007).

4.3 Résultats

4.3.1 Dynamique

La figure 3 représente le POQ initial promu sur la surface de potentiel de l'état excité à $t=0$ fs. Cette configuration correspond à une molécule HCl avec l'hydrogène pointant vers un atome d'oxygène de la surface de glace.

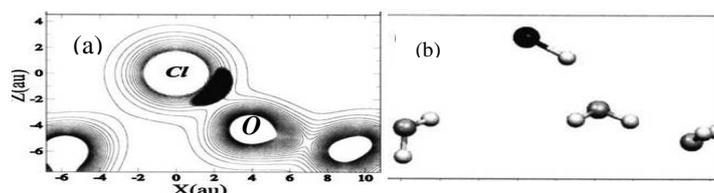


Figure 3 : (a) densité du paquet d'onde initial (en noir) représentant l'atome d'hydrogène sur la surface d'énergie potentielle représentée en contours isoénergétiques. (b) vue moléculaire de la configuration d'équilibre correspondante.

L'évolution temporelle du POQ est représentée sur la figure 4. Aux premiers instants de la propagation, le POQ est accéléré par le mur fortement répulsif de l'atome de chlore. Au bout de 6 fs, la partie inférieure du paquet d'onde entre en collision avec l'atome d'oxygène de la molécule d'eau la plus proche (w_1) tandis que la partie supérieure continue sa propagation (a). Une partie du POQ est

temporairement piégée entre l'atome de Chlore et la surface de glace. La majeure partie du POQ est ensuite réfléchi au-dessus de la surface et une faible partie, de l'ordre de 2% de la densité, diffuse dans la cavité hexagonale de la glace située en dessous du Chlore (b). Vers 36 fs le POQ est définitivement scindé en deux. Au bout de 36 fs, le POQ réfléchi au-dessus de la surface subit une dernière collision avec un hydrogène de la surface de glace (w_2) qui génère de fortes structures d'interférences dans le POQ(c). Après 50 fs, le POQ n'interagit plus avec la surface de glace et les structures induites par les différentes collisions (avec l'oxygène le plus proche, le chlore et l'hydrogène) n'évoluent plus.

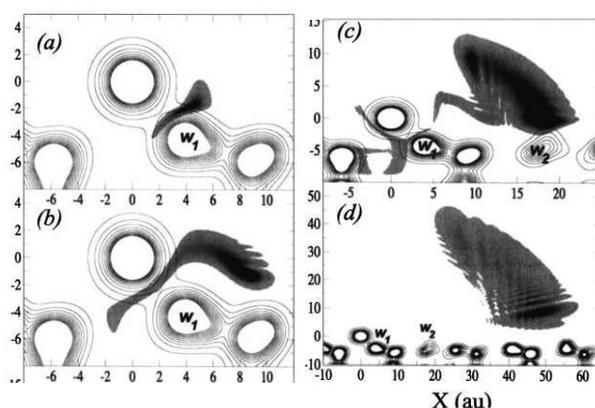


Figure 4 : Evolution temporelle du POQ (a) $t=8fs$; (b) $t= 16fs$; (c) $t= 36fs$; (d) $t=100fs$

4.3.2 Section efficace de photodissociation et distribution angulaire

Nous avons calculé la section efficace de photodissociation $\sigma(E)$, qui représente la probabilité que la molécule a de se dissocier par absorption d'un photon d'énergie E , et la distribution angulaire d'émission de l'atome d'hydrogène $P(\gamma)$ (γ est l'angle entre la normale à la surface et la direction d'émission de l'atome H). Ces deux grandeurs sont calculées à partir de l'analyse du POQ.

Notons que le spectre quantique (Figure 5a) présente des structures oscillantes dues au piégeage temporaire du POQ entre l'atome de chlore et l'oxygène de la surface de glace au début de la propagation et qui conduit à une quantification de l'énergie.

Afin de distinguer les effets classiques des effets purement quantiques,

nous avons effectué des calculs de trajectoires classiques (résolution des équations de Newton). On voit sur la figure 5b que les distributions angulaire classique et quantique sont similaires sauf dans la région située autour de 65° - 75° où des oscillations sont présentes uniquement dans la distribution quantique. Ces oscillations sont dues à des phénomènes d'interférences quantiques et tout le reste est interprétable par des phénomènes classiques. La probabilité d'émission est nulle pour les angles inférieurs à 20° à cause de l'effet d'ombre de l'atome de Cl. Les pics à 34° , 65° et 75° peuvent tous être attribués à des effets « arc en ciel », qui, comme en optique dans le cas des gouttes d'eau, correspondent à un extremum de déviation.

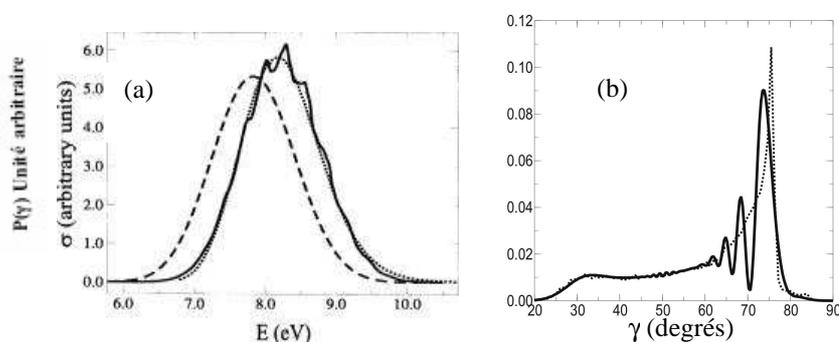


Figure 5 : (a) Section efficace de photodissociation. Trait plein : quantique. Pointillés : classique. Tirets : phase gazeuse- (b) Distribution angulaire. Trait plein : quantique. Pointillés : classique.

5. Conclusion

Dans cet article, nous avons souhaité montrer comment des méthodes numériques de dynamique moléculaire permettent de simuler les processus à la surface de la glace. Nous avons limité la présentation de l'étude au cas 2D de la photodissociation de HCl sur une glace figée, mais nous avons aussi effectué une étude avec 3 degrés de liberté, une comparaison avec la molécule HF, et pris en compte le désordre structural d'une surface de glace à 210 K (Woittequand et al, 2007). Les étapes à venir sont une description classique 4D puis 6D de la photodissociation d'autres molécules comme Cl_2 , NO_3^- , CH_2O , puis la prise en compte du couplage entre la dynamique de photodissociation de la molécule adsorbée et celle de la glace.

Bibliographie

- Abbatt J.P.D., *Chem.rev.*, vol. 103, 2003, p. 4783.
- Balakrishnan N., Kayanaraman C, Sthiyamurthy N., *Physics Reports*, vol. 280, 1997, p. 79.
- Beck M. H., Jackle A., Worth G.A., Meyer H-D., *Physics Reports*, vol. 324, 2000, p1.
- Cerjan C (ed.) *Numerical grids methods and their Applications to Schrodinger Equation*, Dordrecht, Kluwer Academic, 1993.
- Cohen-Tannoudji, Diu B., Laloe F, *Mécanique quantique*, Tome I & II, Paris, Editions Hermann, 2007
- Molina M. J., Tso T. L Molina., L.T., Wang F.C.Y., *Science*, vol. 238, 1987, p.1253 .
- Petrenko V. F., Whitworth R. W., *Physics of Ice*, Oxford, Oxford University Press, 1999.
- Poteriya V., Farnik M., Slavicek P. Buck, U. Kresin V. *J. Chem. Phys.*, vol 126, 2007, p.071101.
- Rivail J. L. *Eléments de Chimie quantique* , Paris, Interéditions/CNRS , 1989.
- Schinke R. *Photodissociation Dynamics*, Cambridge, Univ., Cambridge, 1993.
- Stone A. J. *The theory of intermolecular forces*, Oxford, Oxford University Press 2002
- Woittequand S., Toubin C., Pouilly B., Monnerville M., Briquez, S., Meyer H.-D., *Chem. Phys. Letters*, vol. 406, 2005, p. 202.
- Woittequand S, Etude théorique de la photodissociation de petites molécules adsorbées à la surface de la glace : Application aux molécules HCl et HF , Thèse, université Lille 1, 2007.
- Woittequand S., Toubin C., Pouilly B., Monnerville M., Briquez, S. Picaud S., *Surf. Science*, vol. 601, 2007, p. 3034.
- Woittequand S. Duflot D., Monnerville M., Pouilly B., Toubin C., Briquez S., Meyer H.-D.. *J.Chem. Phys.* 127, 2007, p.164717.
- Yabushita A., Kanda N., Kawanaka N., Kawasaki M., *J. Phys. Chem. A* , 111, 2007, p. 8629.

Stéphane Briquez est né en 1971 à Montbéliard.
En 1997, il a obtenu un doctorat de physique à l'Université de Franche-Comté, dans le domaine de la physique moléculaire.
De 1998 à 1999, il a occupé un poste d'ATER à l'Université Lille 1. Depuis octobre 1999, il est Maître de conférences, au sein du Département Mesures Physiques de l' IUT « A » de l' Université Lille 1.

Il dispense des cours, TD et TP d'Optique (S2 et S3) et de Thermodynamique (S1, S2), ainsi qu'une initiation à la physique Quantique (S4). Il est actif au sein du Laboratoire de Physique des Lasers, des Atomes et des Molécules (PhLAM) - UMR CNRS 8523 - Université Lille 1.

Il travaille sur l'étude théorique par des méthodes de simulation numérique (principalement des méthodes quantiques dépendantes du temps) de l'étude de la dynamique, photodissociation et réactivité de molécules adsorbées à la surface de la glace. Stéphane Briquez a publié d'une douzaine d'articles dans des revues internationales à comité de lecture

Les indicateurs de gaz à effet de serre implicites des produits de la pêche commerciale

Isabelle Dangeard* & Pascal Le Floc'h**

** IUT de Quimper – Université de Bretagne Occidentale
Département GLT*

2 rue de l'Université 29334 Quimper Cedex

*** IUT de Quimper/UMR Amure – Université de Bretagne Occidentale
Département TC*

2 rue de l'Université 29334 Quimper Cedex

isabelle.dangeard@ univ-brest.fr ; plefloch@ univ-brest.fr

**Sections de rattachement : 5, 6
Secteur : Secondaire / Tertiaire**

RESUME : *La production d'indicateurs écosystémiques est fortement encouragée dans le cadre de la Convention sur la Diversité Biologique, ratifiée en 1992 lors de la Conférence de Rio. Dans le cadre des pêcheries commerciales, l'indicateur de gaz à effet de serre implicites répond en partie à une approche écosystémique. Les pêcheries commerciales ont une influence sur les écosystèmes marins dont les effets à long terme peuvent être amplifiés par les conséquences du changement climatique. Dans cet article, nous étudions exclusivement la pression des facteurs anthropiques sur l'environnement, à travers un indicateur décrivant les émissions de gaz à effet de serre de la pêche par unité produite, en fonction de la technique de pêche. La production de ce type d'indicateurs dans les pêcheries, fondés sur la consommation énergétique, s'intègre dans les*

objectifs des programmes de réduction des gaz à effet de serre (GES), conformément au principe de la mise en œuvre du protocole de Kyoto.

MOTS-CLÉS : *Pêcheries, indicateurs, gaz à effet de serre, CO₂, efficacité énergétique.*

1. Introduction

Le Sommet de la Terre de Rio organisé sous l'égide des Nations Unies en 1992 a permis la ratification de la Convention sur la Diversité Biologique, ainsi que l'adoption du texte de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC). Si la première insiste sur la nécessité de préserver la biodiversité afin d'en permettre une utilisation durable, la seconde reconnaît le rôle de l'homme, principalement dans les pays développés, dans l'augmentation de la concentration de l'atmosphère terrestre en gaz à effet de serre (GES), qui entraîne un réchauffement climatique. La pêche est menacée directement par la surexploitation des ressources halieutiques, et indirectement par le réchauffement climatique : d'une part, une partie du CO₂ émis se dissout dans la mer et provoque son acidification, menaçant des organismes calcaires qui sont à la base des chaînes alimentaires, et d'autre part le réchauffement modifie la répartition des espèces. La CCNUCC vise à stabiliser la concentration des gaz à effet de serre à un niveau qui empêche « toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ». La CCNUCC est entrée en vigueur en mars 1994, et énonce des objectifs qualitatifs sur lesquels les pays l'ayant ratifiée s'engagent. En 1997, le Protocole de Kyoto a été ajouté à la CCNUCC, et donne des objectifs chiffrés de réduction des émissions de gaz à effet de serre, par pays, pour la période 2008-2012. Il est entré en vigueur en février 2005.

Dans cet article, nous traitons exclusivement des effets de l'activité de pêche sur la concentration de l'atmosphère terrestre en gaz à effet de serre, analysés à travers les émissions de GES liées à la combustion du carburant utilisé par les bateaux.

Concernant l'activité des pêches maritimes, l'ADEME a estimé, en moyenne, les émissions de GES des produits de la mer débarqués en France, par kg de produit de la mer, à partir de chiffres de l'IFREMER sur le tonnage de produits de la mer débarqué par an et sur la consommation de carburant de la pêche française. Toutefois, cet indicateur est global et ne tient pas compte du type de pêche.

Il est donc proposé de calculer des indicateurs reflétant les émissions de GES nécessaires à la capture des produits de la mer, en fonction du type de pêche pratiqué.

2. Données et méthodes

2.1 Caractéristiques de l'échantillon observé

La typologie des navires de pêche tient compte de deux critères principaux, la technique de pêche principale et la longueur, et s'inspire des travaux engagés dans le cadre des programmes communautaires de collecte des données dans le secteur de la pêche (CE, 2000 ; CE 2001). On distingue les navires pratiquant les arts traînants (chalutage et drague principalement) des unités exerçant les arts dormants (filets, casiers, lignes). Appliquée aux navires de pêche de Bretagne sud, cette typologie (selon le type de pêche et la longueur) conduit à deux catégories principales correspondant à la technique pratiquée (tableau 1).

Technique	Dormants	Traînants
Effectif minimal	20	80
Effectif maximal	55	147
Age en 2005	19.8	20.5
Puissance motrice (kw) en 2005	135	307

Tableau 5 . *Caractéristiques moyennes des catégories étudiées*

Les navires pratiquant les arts « traînants » regroupent essentiellement des chalutiers, associant dans certains cas à la technique du chalut (de fond ou pélagique), la technique de la drague (coquillages). Les unités de pêche identifiées comme des « dormants » exploitent les stocks de poissons ou crustacés à l'aide de filets, de casiers ou de lignes. La distinction principale porte sur la mobilité de l'engin de pêche, les techniques « traînantes » (chalut et drague) étant par définition plus mobiles que les techniques de production dites « dormantes ». Par conséquent, les moyens d'exploitation tractés sont plus exigeants en matière de consommation énergétique que les moyens « dormants ».

Les 1830 navires présents dans la base de données comptable de l'Observatoire économique régional des pêches de Bretagne⁹ ont été pris en compte sur la période 1994-2005 (Observatoire Economique Régional des Pêches, 2007). L'effectif est variable selon les années, 80 unités recensées en 2005 chez les traînants alors que l'effectif maximum fut de 147 navires en 1995. La taille la plus faible chez les dormants est de 20 unités en 1994 et l'échantillon le plus élevé comprend 55 navires en 2000. On dispose pour chaque navire de sa consommation énergétique.

2.2 Indicateurs : méthode de calcul

Nous calculons d'abord les quantités de carburant par unité de production, celle-ci étant mesurée soit en volume (kg de poisson), soit en valeur (euro de chiffre d'affaires). La quantité de carburant consommée est ensuite convertie en émissions de CO₂.

Nous utilisons pour cela les valeurs de l'ADEME (ADEME 2007). C'est à partir de ces chiffres que l'ADEME a produit une estimation du contenu en GES du poisson, à l'exclusion du thon ou des crevettes dont le mode de pêche conduit à des émissions plus importantes : « *L'IFREMER indique que la pêche française consomme environ 250 millions de litres de diesel par an, pour environ 500.000 tonnes de poissons débarqués chaque année. En première approximation, l'émission liée à la pêche d'une tonne de poisson sera donc de 407 kg équivalent carbone* » (ADEME 2007). On notera d'ailleurs que les chiffres indiqués pour la consommation de gazole et le tonnage débarqué comprennent les émissions « amont » du carburant, c'est-à-dire les émissions de production et de transport du gazole utilisé par les navires. Il s'agit dans notre travail de confronter ces premières estimations à des mesures détaillées, en distinguant la technique de pêche (« traînant » vs « dormant »).

Les valeurs publiées dans ADEME (2007) pour les émissions de GES de l'utilisation du gazole comme carburant sont données en équivalent carbone (e-C), et nous les avons donc converties en équivalent CO₂ (compte tenu du facteur multiplicatif 44/12 correspondant au rapport des masses molaires du carbone et du dioxyde de carbone):

⁹. A l'échelle bretonne, les données économiques à la pêche sont collectées par voie d'enquête auprès des pêcheurs et par voie comptable auprès des centres de gestion à la pêche artisanale. L'Ifremer, responsable du système d'information halieutique (SIH), gère l'ensemble des travaux d'enquête portant sur l'activité des navires, leurs productions par espèce et les données économiques. La couverture statistique ne se limite pas à la Bretagne mais est étendue aux trois façades maritimes françaises (Manche-Mer du Nord, Atlantique et Méditerranée). La donnée de type comptable est transmise par les centres de gestion à l'Observatoire économique régional des pêches de Bretagne, dirigé par une organisation professionnelle à laquelle est associée l'UMR Amure (www.umr-amure.fr) ainsi que le Comité Régional des pêches de Bretagne.

Périmètre	Emissions de GES	
	e-C par litre (Ademe 2007)	e-CO ₂ par litre
Gazole, combustion seule	0,726	2,662
Gazole, avec amont	0,804	2,948

Tableau 6 . Emissions de GES du gazole carburant

Pour le calcul des émissions liées à l'utilisation du gazole, nous avons utilisé l'équivalent CO₂ ou e-CO₂, qui tend à devenir un standard en tant qu'unité de mesure des émissions de GES. Nous avons pris en compte les émissions amont du gazole, qui comprennent les émissions d'extraction du pétrole brut, le transport et surtout le raffinage du pétrole. La combustion d'un litre de gazole engendre des émissions, amont compris, de 2,948 kg e-CO₂. On en déduit ensuite les émissions liées au carburant de la pêche par kg de poisson ou par euro de chiffre d'affaires.

Le vocabulaire utilisé dans ce domaine, pour désigner la quantité de GES qui a été émise pour permettre la pêche d'une unité de produits de la mer, n'est pas encore universel : l'Ademe utilise l'expression « facteur d'émission » du poisson ; pour éviter toute ambiguïté, il faudrait parler de facteur d'émission de GES, l'expression « facteur d'émission » s'appliquant aussi à d'autres polluants notamment dans les transports. Des difficultés terminologiques semblables ont été mises en évidence par Hokstra et Chapagain (2008) pour désigner la quantité d'eau nécessaire à la mise sur le marché d'un bien, et ces auteurs ont finalement consacré l'expression « eau virtuelle », bien que cette expression, selon leur avis même, puisse donner une fausse impression qu'il n'y a pas réellement eu utilisation d'eau. Tenant compte de cet argument, nous n'avons pas retenu l'expression « GES virtuels », qui aurait pu laisser penser qu'ils ne sont pas réellement émis. Des expressions du type « GES contenus dans ... », de même que pour l'eau les expressions « embedded water » et « embodied water », laissent penser que le produit final contient effectivement des GES ou de l'eau, ce qui n'est pas le cas. Nous avons finalement utilisé l'expression « GES implicites », puisque ces GES ne sont pas apparents dans le produit de la pêche mais sont nécessaires à sa mise sur le marché.

Quels que soient les termes utilisés, la pêche devra évoluer de façon à minimiser le ratio litre de gazole/kg de poisson, ce qui correspond à une amélioration de l'efficacité énergétique de la pêche. Les autres étapes situées en aval de l'activité de pêche, autrement dit le transport et la distribution finale, ont un impact globalement moins important en termes de gaz à effet de serre (Thrane 2006, Ellingsen and Aanonsen 2006).

3. Résultats et analyse

De façon globale, les débarquements présentent, pour l'année 2005, des GES

implicites de 5,04 kg e-CO₂ par kg de poisson, ce qui correspond à 1,37 kg e-C par kg de poisson.

Les résultats détaillés sont représentés sur les figures 1 et 2 présentant, selon la technique de pêche, les GES implicites du poisson, en volume (par kg de poisson) puis en valeur (par euro de chiffre d'affaires de pêche). Ces GES sont exprimés en équivalent CO₂. Les courbes correspondent à l'évolution de 1994 à 2005 des indicateurs calculés, par catégorie.

On constate d'abord que les GES implicites de la pêche sont plus faibles pour les « dormants » que pour les « traînants ». Ceci s'explique globalement par le moins bon bilan énergétique des traînants, pour lesquels une partie de l'énergie est utilisée pour la traction des chaluts, tandis que pour les dormants la consommation de carburant répond essentiellement au besoin de déplacement entre le lieu de pêche et le lieu de débarquement.

Parmi les « dormants », la meilleure performance environnementale des plus de 12 mètres est très marquée en volume, mais nettement moins en valeur. Ceci s'explique par la présence dominante de « bolincheurs » dans le segment des dormants de plus de 12 mètres (la longueur maximale de ces unités est de 21 mètres pour une longueur moyenne de 16 mètres). Ces unités de pêche utilisent un filet tournant avec un accès limité aux pêcheries (principalement d'espèces pélagiques). Le tonnage débarqué par ces unités atteint des niveaux comparables aux navires traînants de 20-25 mètres en début de période. La production moyenne par navire se maintient entre 200 et 240 tonnes de 1994 à 1996. Alors que la biomasse extraite par les plus gros navires (traînants 20-25 mètres) se stabilise autour de 200 tonnes sur toute la période d'étude, celle des bolincheurs s'élève à 350-400 tonnes de 1997 à 2001, plafonnant à plus de 600 tonnes en fin de période.

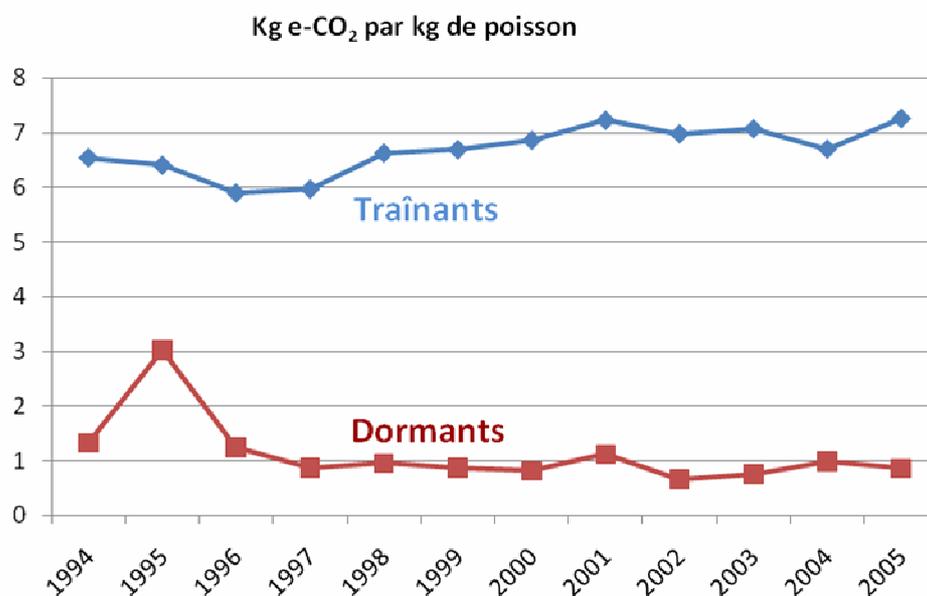


Figure 1 : GES implicites de la pêche, en kg e-CO₂ par kg de poisson débarqué

En 2005 par exemple, le produit des dormants de plus de 12 mètres présentait un niveau de GES implicites de 0,24 kg e-CO₂ par kg. Ce chiffre est très inférieur à celui des « dormants » de moins de 12m, qui est de 3,15 kg e-CO₂ par kg. Les « traînants » de moins de 12m présentent un ratio de 4,4 kg e-CO₂ par kg. Les moins bons résultats, du point de vue des GES implicites, sont obtenus par les « traînants » de plus de 12 mètres, qui présentent des résultats de l'ordre de 7,4 kg e-CO₂ par kg. A titre de comparaison, une étude concernant la pêcherie de morue en Suède indique que la consommation de carburant par kg de poisson débarqué s'élève à 1,4 litre/kg pour les traînants et à 0,34 litre/kg pour les dormants (Ziegler and Hansson, 2003), ce qui correspond à des GES implicites de 4,1 et 1,0 kg e-CO₂ par kg.

La valeur moyenne française publiée par l'Ademe, citée-ci-dessus, est de 0,407 kg e-C par kg de poisson (hors thon et crevettes), soit 1,2 kg e-CO₂ par kg. La valeur de notre échantillon est de 5 kg e-CO₂ par kg, très supérieure à l'estimation de l'Ademe portant sur la moyenne nationale. Cela s'explique en partie par la non représentativité de la flottille étudiée ici par rapport à la moyenne nationale, les flottilles bretonnes comportant une part plus importante de chalutiers pêchant à grande distance des côtes. On ne peut non plus exclure des divergences méthodologiques sur la collecte et le traitement des données. Il n'est

pas certain que les estimations faites à un niveau global de la consommation énergétique de la pêche tiennent compte des écarts parfois importants entre techniques de capture et pondèrent les données pour tenir compte du poids de chaque technique de production. De plus, au sein d'une même flottille utilisant des moyens de production identiques (moyens traînants ou dormants), le critère de longueur des unités de pêche modifie substantiellement la consommation énergétique, et donc les émissions de GES.

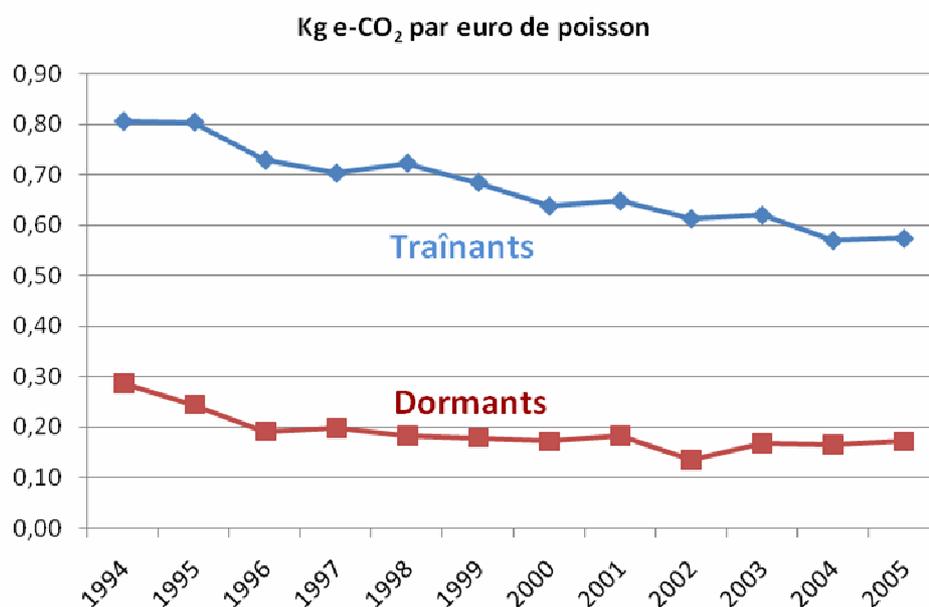


Figure 2 : GES implicites de la pêche, en kg e-CO₂ par euro de poisson débarqué

Les GES implicites de la pêche, par kg de poisson, varient donc d'un facteur 30 entre les systèmes les plus performants, d'un point de vue énergétique, et les moins performants.

En valeur, l'écart est moins important compte tenu de la valeur plus faible des espèces débarquées par les « dormants » : en 2005, les « dormants » présentent des GES implicites de 0,5 kg e-CO₂ par euro de Chiffre d'Affaires (CA), tandis

que les « traînants » présentent des ratios augmentant en fonction de leur taille, allant de 0,85 à 1,89 kg e-CO₂ par euro de CA. L'écart en valeur varie donc d'un facteur 3,7 entre les techniques les plus performantes et les moins performantes, d'un point de vue énergétique.

4. Limites et perspectives

Limites : l'indicateur utilisé ici pour traduire les GES implicites des produits de la mer est basé uniquement sur la principale source d'émission de GES : les émissions de CO₂ lors de l'activité de pêche. Ne sont pas pris en compte, toujours dans la phase de pêche : les émissions de GES liées à la production de froid et aux autres consommations, notamment les engins de pêche (filets, ...); les déplacements domicile-travail des pêcheurs; les émissions de production, d'entretien et de recyclage des bateaux en fin de vie. Ne sont pas non plus pris en compte les autres phases, qui comprennent les GES liés au transport et au stockage aval, du port de débarquement du poisson jusqu'aux lieux de consommation, et les émissions des consommateurs (transport et préparation). La prise en compte des émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie de la pêche augmenterait donc ces valeurs. Et de façon plus large une analyse ACV (Analyse du Cycle de Vie) ajouterait les autres impacts environnementaux de la pêche, notamment les émissions polluantes (de l'air pour la combustion du carburant et de l'eau pour les peintures antifouling) ou les dommages aux fonds marins dans le cas des chaluts de fond. Par ailleurs, la pression sur la biodiversité des espèces marines pourrait être étudiée à travers l'état des stocks des espèces pêchées dans la zone de pêche de laquelle le poisson est extrait. De tels indicateurs ont été publiés (FAO 2005). La pression sur la biodiversité est en effet plus faible si le navire exploite une espèce abondante dans le lieu de pêche du navire, tandis que dans le cas de stocks proches de l'extinction ou en cours de reconstitution, la pression sur la biodiversité est très forte.

Perspectives : les estimations proposées ici constituent un premier pas vers la comparaison des techniques de pêche entre elles, qu'il faudra également comparer, d'un point de vue environnemental, à d'autres sources de protéines (viande, poisson, protéines végétales, ...), et cela selon les lieux de consommation. Cela pourrait servir à mettre en place un système d'information du consommateur sur le caractère plus ou moins durable des produits qui lui sont proposés, ou encore à construire des politiques publiques destinées à orienter les choix des acteurs économiques. Cette question est plus généralement discutée ci-dessous.

5. Conclusions sur les politiques publiques

L'augmentation du coût du carburant tend, naturellement, à défavoriser les techniques les moins efficaces d'un point de vue énergétique. Or des mesures de compensation du prix du carburant ont été mises en place en France. En euro constant sur la base de l'année 2005, le prix au litre a augmenté de 8% par an depuis 1994. La hausse intervenue en 2000 avait été compensée par un allègement des charges sociales et une exonération de la taxe créée et de la redevance d'équipement des ports de pêche (Observatoire Economique Régional des Pêches, 2006). Si cette augmentation a laissé place à un recul du prix du gazole jusqu'en 2003, l'augmentation actuelle s'inscrit davantage dans une perspective de long terme, amenant les acteurs à explorer de nouvelles pistes visant à réduire la consommation de combustible. L'augmentation du prix du carburant ne semble pas avoir modifié les comportements de pêche sur toute la période d'étude. Cela s'explique en partie par l'adoption d'un mécanisme de compensation du prix du gasoil, le FPAP (Fonds de Prévention des Aléas à la Pêche), mis en place en 2005 et 2006 (Le Floc'h *et al.*, 2008 ; Union Européenne, 2006).

Agissant en sens contraire au principe du pollueur-payeur, ces mesures sont équivalentes à une subvention-carbone, alors que la seule tendance compatible avec la maîtrise des GES est au contraire une taxe-carbone. Celle-ci serait très défavorable aux professionnels de la pêche. Les pouvoirs publics, souhaitant au contraire aider les professionnels, ont cherché à mettre en place des mesures d'aide à la pêche présentées comme « euro-compatibles », c'est-à-dire écologiquement correctes, telles que les « contrats bleus ». Ainsi, les politiques publiques se sont principalement inscrites dans un cadre conjoncturel pour soutenir les flottilles de pêche les plus fragilisées par la hausse du coût de l'énergie. Or, ces mesures n'ont fait que renforcer le problème de la dépendance énergétique des navires, notamment pour les unités pratiquant les techniques traînantes. Ainsi, la taxe carbone invalidée en décembre 2009 par le conseil constitutionnel prévoyait un taux de taxation réduit pour les pêcheurs. Paradoxalement, c'est l'hétérogénéité de la taxe carbone qui a entraîné son rejet pour non égalité devant les charges publiques. La volonté politique de soutenir la pêche se heurte donc à des règles d'équité. Il est donc impératif d'orienter les mesures d'encadrement des flottilles vers des politiques structurelles.

Se pose alors la question de l'accès aux stocks, selon un mode de gestion individualisé des droits de pêche, qui pourrait être fondé sur des indicateurs d'intensité énergétiques. En effet, une flotte surdimensionnée par rapport à la ressource exploitable conduit inévitablement à une détérioration du ratio énergétique : l'effort de pêche et donc la dépense de carburant sont plus importants pour une même quantité pêchée par bateau. La quantité de poisson disponible pour une pêche durable est donc limitée, et tout dépassement des limites « raisonnables » accentue les problèmes, qu'ils concernent la biodiversité ou les émissions de GES.

Dans ce contexte de raréfaction des ressources halieutiques et de réchauffement

climatique, l'étude des GES implicites de la pêche en fonction des techniques employées apporte un nouvel éclairage au problème de gestion des pêcheries. Ces indicateurs pourront servir de base à un affichage environnemental des produits proposés aux consommateurs, qui devrait se mettre en place progressivement comme le prévoit le texte du projet de loi dit « Grenelle II », dont l'article 85 prévoit que « *A partir du 1er janvier 2011, le consommateur doit être informé, par voie de marquage, d'étiquetage, d'affichage ou par tout autre procédé approprié, du contenu en équivalent carbone des produits et de leur emballage ainsi que de la consommation de ressources naturelles ou de l'impact sur les milieux naturels qui sont imputables à ces produits au cours de leur cycle de vie* ». Compte tenu des questions méthodologiques qui se posent, il n'est pas certain que ces délais puissent être respectés, étant donné le temps qui sera nécessaire à la rédaction des décrets qui préciseront « *les modalités et conditions d'application du présent article pour chaque catégorie de produits et selon leur mode de distribution* ». Les GES de la pêche constituant le principal impact environnemental des produits de la mer, un tel affichage devra au moins prendre en compte les GES implicites de ces produits. Destiné à infléchir les choix des consommateurs vers des produits plus respectueux de l'environnement, il pourrait modifier la compétitivité relative des techniques de pêche en infléchissant les prix de marché, en tout cas pour les produits vendus en France. Et alors, au-delà de la question de l'harmonisation européenne d'une telle information du consommateur, se posera la question de l'intelligibilité par les consommateurs d'informations sur des impacts environnementaux par nature multicritères.

Bibliographie

ADEME. 2007. Bilan Carbone® Entreprises et Collectivités, Guide des facteurs d'émissions - version 5.0 - Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées, janvier 2007, 240p.

Bihel, J., Le Floch, P. 2007. Résultats des flottilles artisanales 2005/2006 - Note de synthèse. Observatoire Economique Régional des Pêches de Bretagne. Septembre 2007. 52p.

Blanchard, F., and Vandermeirsch, F. 2005. Warming and exponential abundance increase of the subtropical fish *Capros aper* in the Bay of Biscay (1973-2002). *C. R. Biologies* 328: 505-509.

Communauté Européenne. 2000. Règlement (CE) n°1543/2000 du 29 juin 2000 instituant un cadre communautaire pour la collecte et la gestion des données nécessaires à la conduite de la Politique Commune de la Pêche. 16p

Communauté Européenne. 2001. Règlement (CE) n°1639/2001 de la commission du 25 juillet 2001 établissant les programmes communautaires minimal et étendu pour la collecte des données dans le secteur de la pêche. 63p.

Conseil constitutionnel 2009. Décision n° 2009-599 DC du 29 décembre 2009 (Loi de finances pour 2010). Décembre 2009.

Ellingsen H., Aanonsen S. A., 2006. Environmental impacts of wild caught cod and farmed salmon – A comparison with chicken, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1(1), 60-65

FAO 2005. L'état des ressources halieutiques marines mondiales. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome, 2005.

Guillotreau, P. 2003. Prices and margins along the European seafood value chain. Les cahiers de l'Artemis, n°4, 219p

HOEKSTRA Arjen and CHAPAGAIN Ashok (2008). Globalization of Water : Sharing the Planet's Freshwater Resources. Wiley Blackwell, feb. 2008.

Le Floc'h P., Thébaud O., Boncoeur J., Daurès F., Guyader O., 2008, Une évaluation des performances économiques de la pêche côtière : le cas de la Bretagne, *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, n°5, 753-771.

Observatoire Economique Régional des Pêches, 2007, Résultats des flottilles artisanales, 2006/2007, note de synthèse, 55p

Observatoire Economique Régional des Pêches, 2006, Résultats des flottilles artisanales, 2005/2006, note de synthèse, 50p

République française 2009. PROJET DE LOI portant engagement national pour l'environnement. Ref : NOR : DEVX0822225L/Bleue-1, Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire.

Thrane M., 2006. Life Cycle Assessment of Danish fish products – New methods and insights, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(1), 66-74

Ziegler F., Hansson P.-A., 2003, Emissions from fuel combustion in Swedish cod fishery, *Journal of Cleaner Production*, 11, 303-314.

Union européenne, (2006). *Aide d'Etat n° C9 :2006 (ex NN 85/2005) _ Fonds pour la prévention des risques liés aux activités du secteur de la pêche*, Journal officiel de l'Union européenne, 5p.

Sigles

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

CCNUCC : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

e-C : équivalent carbone

e-CO₂ : équivalent CO₂

GES : Gaz à Effet de Serre

Ifremer : Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer.



Isabelle Dangeard est enseignant-chercheur en gestion à l'IUT de Quimper, Université de Bretagne Occidentale. Elle encadre la réalisation de Bilans Carbone® par ses étudiants (stages et projets tuteurés). Ses thèmes de recherche portent sur les émissions de gaz à effet de serre, à travers les systèmes d'informations environnementaux des entreprises, la fiscalité énergétique et la gouvernance climatique



Pascal Le Floc'h est enseignant chercheur à l'IUT de Quimper, Université de Bretagne Occidentale. Il est membre de l'UMR Amure. Ses thèmes de recherche portent sur l'économie des ressources marines vivantes. Il coordonne les travaux de collecte des données économiques à la pêche au sein de l'Observatoire Economique Régional des Pêches de Bretagne.

Suivi automatisé et modélisation de la cinétique de germination de grains de maïs par traitement d'images couleur

Alain Clément, Bertrand Vigouroux

*Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Automatisés (UPRES EA 4094)
Institut Universitaire de Technologie
4, Boulevard Lavoisier - BP 42018 - 49016 Angers Cedex*

alain.clement@univ-angers.fr ; bertrand.vigouroux@univ-angers.fr

Sections de rattachement : 61, 63

Secteur : Secondaire

RESUME : *L'évolution temporelle des propriétés géométriques d'un lot de 393 semences de maïs placées dans un incubateur de Jacobsen a pu être mesurée grâce au développement d'une chaîne automatisée d'acquisition et de traitement d'images couleur. Par l'analyse de ces propriétés géométriques, nous montrons que (i) la compacité des semences est un bon marqueur de l'apparition des germes et que (ii) l'imbibition de la graine suit une loi du premier ordre. Le système de vision fournit la distribution statistique des temps de germination, ainsi que celle des temps de relaxation de l'imbibition.*

MOTS-CLÉS : *Analyse d'images couleur, semences, maïs, imbibition, germination.*

1. Introduction

L'évaluation de la qualité des semences est une préoccupation permanente pour l'industrie des semences (McDonald, 1998). Le taux d'imbibition et le taux de germination sont deux facteurs importants de la qualité. En pratique, le taux d'imbibition¹⁰ des graines est évalué par la mesure de l'évolution de leur poids. Cette mesure est non seulement longue et fastidieuse, mais elle peut être imprécise pour les petites graines (Dell'Aquila et al. 2000). Le taux de germination¹¹ est une mesure importante pour l'évaluation de la vigueur. En pratique, cette mesure est effectuée par comptage. Des techniciens spécialisés

¹⁰ Pourcentage relatif d'imprégnation en eau.

¹¹ Pourcentage de graines pour lesquelles le germe est sorti dans un temps donné.

examinent ainsi des centaines de graines, plusieurs fois par jour, avec généralement un manque de données au cours de la nuit et le week-end, de sorte que certaines parties intéressantes de la courbe de germination peuvent être manquantes.

Ces tâches très consommatrices de temps sont progressivement remplacées par des procédés automatisés qui tirent avantage de l'accroissement des capacités des systèmes de traitement de l'image. Les premiers systèmes n'étaient capables de suivre qu'un petit nombre de graines, 50 ou moins (van der Heijden et al. 1999, Geneve 2001, Hoffmaster et al. 2003, Oakley et al. 2004, Dell'Aquila 2005, Peñaloza et al. 2005, Dell'Aquila 2007). Cependant, l'évaluation de la qualité des semences, repose en général sur des multiples de 100 graines. Dans ce but, un système d'acquisition d'images pour la surveillance automatisée de la germination de 100 graines, dans un incubateur Jacobsen, a été développé il y a quelques années (Ducournau et al. 2004). Ce système est aujourd'hui en mesure de suivre la germination de 400 graines (Plainchault et al. 2007), à l'aide de 4 caméras (une caméra pour 100 graines) et permet des comptages réguliers à des intervalles de temps choisis. Cependant, le système ne peut fournir que le nombre total de graines germées et comme il fonctionne en comparant l'image au temps t à une image de référence au temps t_{ref} , ses résultats ne sont valables qu'à condition que la différence entre les images soit due à l'apparition de germes ce qui n'est pas le cas quand l'imbibition n'est pas terminée au temps t_{ref} .

Nous présentons ici une amélioration significative de ce système d'imagerie, consistant en un suivi individualisé de chaque semence. Le système analyse l'évolution des propriétés géométriques des graines dans l'incubateur, ce qui nous permet de proposer une modélisation de la cinétique de germination.

2. Matériel et méthodes

2.1 Acquisition et traitement des images

Comme décrit dans (Ducournau et al. 2004), des lots de graines (jusqu'à 400 graines) sont semés sur du papier buvard épais hydraté en permanence et maintenus dans l'obscurité à une température fixée (par exemple 15 ° C ou 20 ° C) pendant plusieurs jours dans un incubateur Jacobsen. Quatre caméras 3-CCD couleur sont utilisées pour l'acquisition des images. Les caméras sont contrôlées par un logiciel automatisé, qui pilote à chaque prise de vue l'ouverture et la fermeture du couvercle de l'incubateur, ainsi que l'éclairage de la scène. Ce système permet l'enregistrement continu de la germination à une fréquence choisie (généralement 12 ou 24 images par jour). Les images, codées en RVB, sont stockées dans une base de données. Toutes les images d'une même expérience de germination (en général 40 ou 50) sont traitées et analysées en une seule étape, au moyen de la plate-forme logicielle Isaac®, décrite dans (Clément 2001). Les images couleur sont binarisées (les graines et les germes en blanc, le fond en noir) par une analyse hiérarchique de l'histogramme de la composante rouge (Clément et Vigouroux, 2002). La surface, le périmètre et les coordonnées du centre de

masse de chaque semence sont calculés à partir de images binaires. Les graines sont étiquetées et les coordonnées de leur centre de masse sont utilisées pour les suivre¹² individuellement d'une image à l'autre tout au long de la série temporelle. Un exemple est présenté en figure 1. Enfin, les surfaces et les périmètres des semences sont exportés dans un fichier Excel (une feuille par semence).

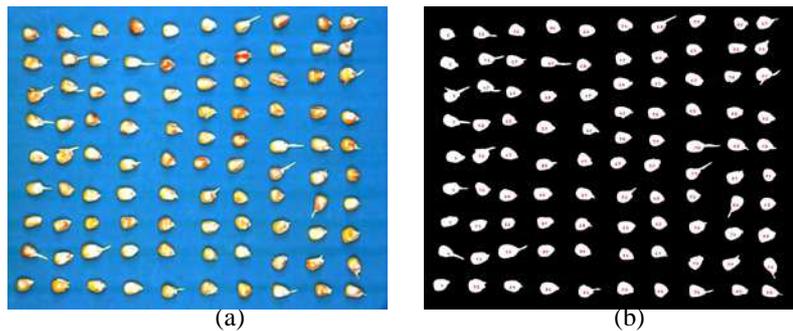


Figure 7 : Image RVB (a) et image binaire étiquetée (b) d'un lot de 95 graines de maïs 66 heures après semis (pour une seule des 4 caméras).

2.2 Modélisation de l'imbibition

L'imbibition des graines avant la germination entraîne une augmentation de leur volume et, par conséquent, de leur surface projetée sur les images. Il a été prouvé pour *Brassica oleracea* L. (Dell'Aquila et al. 2000) et *Medicago truncatula* (D. Demilly et al. 2007) que mesurer la surface des semences est une méthode pertinente pour le suivi de leur imbibition. Le cas le plus simple est celui où la courbe des surfaces en fonction du temps peut être séparée en trois parties (figure 2a) : la partie I montre l'augmentation de surface en raison de l'imbibition ; cette surface atteint un plateau (partie II) quand l'imbibition est complète puis augmente de nouveau en raison de l'émergence du germe (partie III). Malheureusement, il existe des cas où l'émergence du germe survient avant la fin de l'imbibition, ce qui entraîne l'absence de la partie II et rend l'interprétation de la courbe plus difficile. La difficulté peut être surmontée en considérant en plus de la surface (S), le périmètre (P) de la semence afin de calculer la compacité (C) :

$$C = \frac{4\pi S}{P^2} \quad [1]$$

Dans l'hypothèse où l'imbibition est un phénomène isotrope, les périmètres et les surfaces peuvent être exprimées par :

¹² Lors de la croissance du germe, certaines gaines se déplacent en roulant sur elles-mêmes.

$$P(t) = \int_0^{2\pi} k(t) \cdot r_0(\theta) \cdot d\theta \qquad S(t) = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} [k(t) \cdot r_0(\theta)]^2 \cdot d\theta \qquad [2]$$

où $r_0(\theta)$ représente les positions des points du contour des semences en coordonnées polaires avant imbibition, et $k(t)$ l'augmentation de la taille en raison de l'imbibition. La compacité des semences vaut donc :

$$C = 2\pi \frac{\int_0^{2\pi} r_0^2(\theta) \cdot d\theta}{\left[\int_0^{2\pi} r_0(\theta) \cdot d\theta \right]^2} \qquad [3]$$

Cette formule est indépendante du temps tant que le germe n'apparaît pas. Un exemple est donné par la figure 2b.

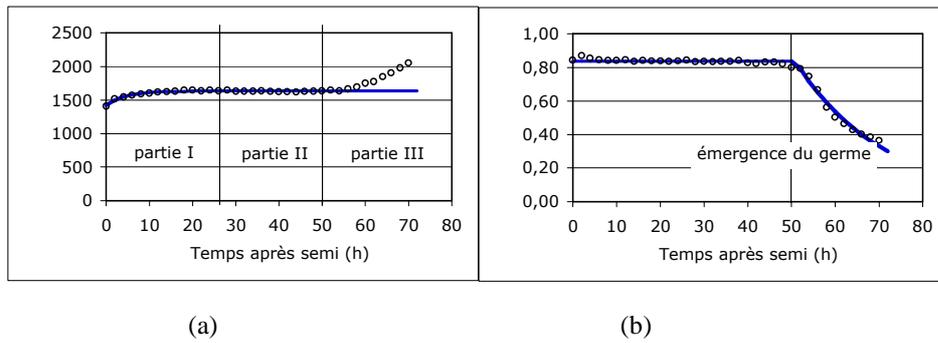


Figure 8 : Évolution temporelle de la surface (a) et de la compacité (b) de la graine (graine n°35 – figure 1b).

La modélisation de l'imbibition et de la germination peut donc être obtenue en suivant l'évolution temporelle de la surface et de la compacité des semences telles que mesurées par l'analyse d'images. En supposant que l'imbibition suive une loi du premier ordre, l'évolution temporelle de la surface des semences peut être exprimée par :

$$S(t) = S_M + (S_0 - S_M) \exp\left(-\frac{t}{\tau_S}\right) \qquad [4]$$

où S_0 est la surface des semences avant imbibition, S_M la surface des semences après imbibition complète, et τ_S le temps de relaxation¹³ de cette surface. De

¹³ Temps au terme duquel le paramètre a décré d'un facteur e dans un processus du 1^{er} ordre.

façon analogue, l'évolution temporelle de la compacité peut être exprimée par :

$$C(t) = C_0 \exp(t - \tau_c) u(t - \tau_E) \quad [5]$$

où C_0 est la compacité constante des semences avant t_E , l'instant d'émergence du germe, et τ_c est le temps de relaxation de la compacité. Dans cette expression, $u(\cdot)$ est la fonction d'Heaviside. Dans une première étape, les paramètres C_0 , t_E et τ_c de chaque semence sont obtenus à partir des courbes $C(t)$, en utilisant le solveur d'Excel. Dans une deuxième étape, les courbes $S(t)$, pour des valeurs de t inférieures à t_E , fournissent S_0 , S_M et t_S . Dans le cas où les surfaces sont calculées en nombre de pixels, en raison de l'absence d'étalonnage de la machine de vision, la seconde étape donne t_S et le ratio S_M / S_0 .

3. Résultats

Un lot de 393 semences de maïs (*Zea mays* L.) a été choisi pour illustrer la méthode. Les grains ont été placés dans un incubateur de Jacobsen à une température de 20 ° C. Chacune des quatre caméras a pris une image toutes les deux heures, sur une période de 72 heures, fournissant un total de 148 images qui ont été analysées de façon automatisée, comme indiqué dans la section 2.

La première image de la série temporelle permet de caractériser les grains avant le démarrage de l'imbibition. La compacité moyenne est de 0,82 avec un écart type de 0,03. L'histogramme des surfaces des grains au temps zéro est donné sur la figure 3 ; La distribution est gaussienne, avec un ratio de 2,39 entre la plus grande et la plus petite des semences.

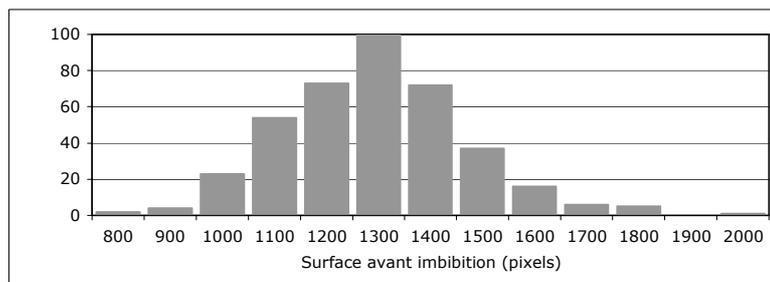


Figure 3 : Histogramme des surfaces des grains avant imbibition (lot de 393 semences de maïs).

Les erreurs quadratiques moyennes (RMSE) entre les compacités mesurées expérimentalement et les valeurs théoriques (équation 5) sont comprises entre 0,005 et 0,046 pour l'ensemble des 393 grains, avec une valeur moyenne de 0,012, ce qui justifie le choix du modèle. La connaissance du temps de germination t_E fourni par la machine de vision permet de représenter le nombre de grains germés en fonction du temps (ligne continue sur la figure 4). Comme

attendu, la courbe a la forme d'une fonction de distribution gaussienne (en pointillés sur la figure 4).

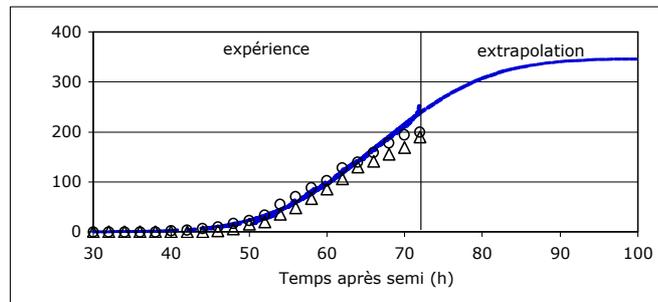


Figure 4 : Nombre de grains germés en fonction du temps : valeurs mesurées par traitement d'images en trait continu, valeurs gaussiennes théoriques en pointillés, et mesures de 2 experts représentées par les ronds et les triangles.

En comptant le nombre de grains germés sur les images, deux techniciens expérimentés ont obtenu - pour l'ensemble des 393 semences de maïs - les valeurs indiquées sur la figure 4 par des cercles (expert n°1) et des triangles (expert n°2). Il y a une bonne correspondance entre les trois évaluations (une par l'analyse d'images, deux par les experts). Le travail des experts est facilité s'ils peuvent observer une série de quelques images (en général 5) avant et après la germination. Malheureusement, la procédure est impossible vers la fin de l'expérience (72 heures). Cela pourrait expliquer le décalage entre les courbes de la figure 4, pour les temps de plus de 66 heures. Néanmoins, ces résultats confirment, sur un échantillon significatif de près de 400 graines, qu'il est pertinent d'évaluer la cinétique de germination à partir de l'évolution temporelle de la mesure de compacité.

Avant l'émergence du germe (c'est-à-dire pour $t < t_E$), les surfaces mesurées expérimentalement correspondent bien aux surfaces théoriques (équation 4) : pour les 393 grains, les RMSE varient de 2 à 59 pixels, avec une valeur moyenne de 13 pixels (ces valeurs doivent être comparées à la moyenne des surfaces avant imbibition, soit 1342 pixels). La capacité d'imbibition peut être évaluée par le ratio S_M / S_0 et le temps de relaxation t_S . Pour notre lot, le ratio S_M / S_0 varie de 1,16 à 1,29, soit une moyenne de 1,20 et un écart type de 0,03. Il est donc sensiblement constant, bien que la surface avant imbibition varie beaucoup d'un grain à l'autre (figure 3). Le temps de relaxation de l'imbibition révèle de grandes différences entre les grains (figure 5) : t_S varie de 1,0 à 76,1 heures, avec une valeur moyenne de 8,6 heures et suit une distribution qui n'est pas gaussienne :

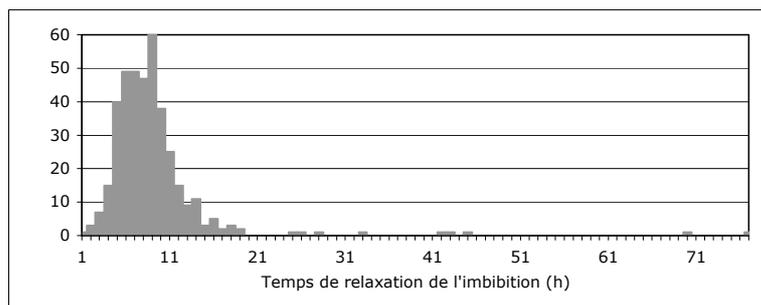


Figure 5 : Histogramme des temps de relaxation de l'imbibition (lot de 393 semences de maïs)

4. Conclusion et perspectives

Nous avons démontré que le suivi de l'évolution temporelle des propriétés géométriques des semences pendant leur germination dans un incubateur Jacobsen permet de modéliser leur cinétique de germination en distinguant les phases d'imbibition et de germination. La compacité des semences est un bon critère pour détecter l'apparition du germe, et la surface des semences montre que l'imbibition des grains de maïs suit une loi de premier ordre. La machine de vision utilisée dans cette démonstration est entièrement automatisée et peut traiter jusqu'à 400 graines en parallèle. Son utilisation peut contribuer à obtenir une meilleure connaissance des processus d'imbibition et de germination pour d'autres semences que le maïs, facilitant ainsi l'évaluation de la qualité des lots de semences.

Remerciements

Nous tenons à remercier la Station Nationale d'Essai des Semences (SNES, Angers, France) pour nous avoir fourni les images utilisées dans cette publication et tout particulièrement M.H. Wagner pour son travail d'expertise (expert n°2 dans le texte). Enfin, nous soulignons que ce travail a bénéficié en partie d'une subvention de la Région des Pays de la Loire (France).

Bibliographie

Clément A., Isaac : une plate-forme pour le développement et la mise en routine de méthodes d'analyse et de traitement d'images en couleur. Actes du *Colloque National de Recherche dans les Instituts Universitaires de Technologie*, 13 – 15 juin 2001, Roanne, France, p. 413-422.

Clément A., Vigouroux B., Unsupervised classification of pixels in color images by hierarchical analysis of bi-dimensional histograms. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 6 – 9 October 2002, Hammamet, Tunisia, 2, p. 85-89.

Dell'Aquila A., van Eck J. W., van der Heijden G. W. A. M., The application of image analysis in monitoring the imbibition process of white cabbage (*Brassica oleracea* L.) seeds. *Seed Science Research*, vol. 10, 2000, p.163-169.

Dell'Aquila A., The use of image analysis to monitor the germination of seeds of broccoli (*Brassica oleracea*) and radish (*Raphanus sativus*). *Annals of Applied Biology*, vol. 146, 2005, p. 545-550.

Dell'Aquila A., Pepper seed germination assessed by combined X-radiography and computer-aided imaging analysis. *Biologia Plantarum*, vol. 51, 2007, p. 777-781.

Demilly D., Wagner M.H., Brunel S., Dürr C., Vigouroux B., Using computer vision to analyse the relationship between physical characteristics of *Medicago truncatula* seeds and their germination and root elongation. Actes du *Colloque Végétal et Semences*, 29 – 30 novembre 2007, Angers, France.

Ducournau S., Feutry A., Plainchault P., Revollon P., Vigouroux B., Wagner M. H., An image acquisition system for automated monitoring of the germination rate of sunflower seeds. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 44, 2004, p. 189-202.

Geneve R. L., Kester S. T., Evaluation of seedling size following germination using computer-aided analysis of digital images from a flat-bed scanner. *HortScience*, vol. 36, 2001, p. 1117-1120.

Hoffmaster A. L., Fujimura K., McDonald M. B., Bennett M. A., An automated system for vigor testing three-day-old soybean seedlings. *Seed Science and Technology*, vol. 31, 2003, p. 701-713.

McDonald M. B., Seed quality assessment. *Seed Science Research*, vol. 8, 1998, p. 265-275.

Oakley K., Kester S. T., Geneve R. L., Computer-aided digital image analysis of seedling size and growth rate for assessing seed vigour in *Impatiens*. *Seed Science and Technology*, vol 32, 2004, p. 907-915.

Peñaloza P., Ramirez-Rosales G., McDonald M. B., Bennett M. A., Lettuce (*Lactuca sativa* L.) seed quality evaluation using seed physical attributes, saturated salt accelerated aging and the seed vigour imaging system. *Electronic Journal of Biotechnology*, vol. 8, 2005, p. 299-307.

Plainchault P., Demilly D., Vigouroux B., Bertrand D., Feutry A., De l'analyse d'image au suivi de la germination : utilisation de la vision artificielle appliquée au végétal. Actes du 4^o colloque interdisciplinaire en instrumentation, 17 – 19 octobre 2007, Nancy, France, p. 40-45.

Van der Heijden G., Polder G., van Eck J. W., Jalink H., van der Schoor R., Automatic determination of germination of seeds. Proceedings of the *World Seed Conference*, compiled and edited by the ISTA Secretariat, 1999, p. 151-160.



Alain Clément a obtenu un Doctorat en Traitement des Images et du Signal à l'Université d'Angers en 2002. Il est aujourd'hui Maître de Conférences à l'Institut Universitaire de Technologie d'Angers où il enseigne la programmation, les réseaux, les bases de données et le traitement des images. Ses travaux de recherche au Laboratoire LISA portent sur la segmentation vectorielle des images couleur et multicomposantes, en particulier sur les méthodes de classification par analyse d'histogrammes multidimensionnels



Bertrand Vigouroux est professeur émérite de l'université d'Angers (France). Spécialisé à l'origine en physique de l'état solide, il a étudié la relaxation spin-réseau à la surface des métaux et aux interfaces métal-isolant. Depuis 1990, il s'est reconverti dans le domaine du traitement des images numériques. Il s'intéresse à l'heure actuelle au traitement vectoriel des images couleur et multimodales, avec pour champ d'application le domaine végétal (suivi automatisé de l'imbibition et de la germination de semences, suivi automatisé du stress hydrique du forsythia, ...).

Evaluation de l'activité anti-Listeria de textiles fonctionnalisés : suivi microbiologique et état physiologique de Listeria innocua

Elise Chadeau, Nadia Oulahal, Emna Jelassi & Pascal Degraeve

*IUTA – Université Lyon 1
Laboratoire de Recherche en Génie Industriel Alimentaire (EA n°3733)
Département de Génie Biologique, Technopole Alimentec, rue Henri de Boissieu*

F-01060 Bourg en Bresse CEDEX 9

*elise.chadeau@iut.univ-lyon1.fr ; nadia.oulahal@iut.univ-lyon1.fr ;
pascal.degraeve@iut.univ-lyon1.fr*

**Section de rattachement : 64
Secteur : Secondaire**

RESUME :

*Les biofilms présents sur les surfaces de travail et sur les vêtements de travail dans le secteur agro-alimentaire constituent une source de contamination croisée non négligeable pour les aliments. Un textile de composition couramment utilisée en agro-alimentaire (65% coton- 35% polyester) a été fonctionnalisé pour être antimicrobien à l'aide de PHMB ou d'argent. Pour ces 2 textiles fonctionnalisés, l'activité anti- **Listeria innocua** a pu être évaluée en se basant sur la norme ISO 20743/2005 et l'état physiologique des cellules a été suivi par le marquage à l'aide de fluorochromes : kit Live/Dead[®] BacLight[™]. La technique d'épifluorescence nous a permis de mettre en évidence des cellules viables non cultivables dans les 2 cas.*

MOTS-CLÉS : *textiles antimicrobiens, Listeria innocua, activité antimicrobienne, épifluorescence, état physiologique.*

1. Introduction

Les biofilms, définis comme une communauté de micro-organismes adhérant entre eux et à une surface, marquée par la sécrétion d'une matrice adhésive et protectrice, posent de réels problèmes de contaminations croisées dans les industries agro-alimentaires. *Listeria monocytogenes*, bacille à Gram positif, est un germe pathogène pour l'homme et est responsable de listériose. L'alimentation représente une des causes majeures de contaminations croisées dues à la capacité de cette bactérie à adhérer à différentes surfaces. En effet, cette souche a été isolée de différentes sources comme les légumes, la viande ou encore les aliments transformés. Certains auteurs ont démontré que *L. monocytogenes* est capable d'adhérer à divers matériaux comme l'acier inoxydable ou encore le polypropylène et cette adhésion est dépendante du temps (Beresford *et al.*, 2001). Elle est souvent responsable de contaminations croisées (Harvey, 1992). *Listeria innocua* possède, quant à elle, des similitudes par rapport à *L. monocytogenes* et a été retenue dans cette étude. Afin de lutter contre ces contaminations croisées, les textiles à visée antimicrobienne pourraient être une solution. En effet, différents chercheurs travaillent sur ce type de matériaux et la demande est très forte (Ramachandran *et al.* 2004). Différentes méthodes de modification existent dans le but de fonctionnaliser des textiles pour les rendre antimicrobiens. Dans cet article nous développerons 2 méthodes : une utilisant un liant et une autre utilisant un brevet n° EP 0955069 (Chatelin *et al.*, 2006).

Le PHMB (polyhexaméthylène biguanide) est un polymère cationique formé de groupes biguanides liés par des chaînes hexaméthylène. Il est utilisé dans les industries alimentaires et pour la désinfection des piscines (McDonnell *et al.*, 1999). Cette molécule est active sur les bactéries à Gram positif et à Gram négatif mais n'est pas sporicide. Le PHMB a pour cible les membranes bactériennes (cytoplasmique et externe). Cet agent antimicrobien va entraîner une modification de la perméabilité membranaire et une altération de certaines enzymes associées.

L'activité antimicrobienne de l'argent est connue depuis longtemps, il peut se présenter sous diverses formes : l'argent métallique, l'argent sulfadiazine ou encore fixé à des zéolites, forme la plus couramment utilisée dans les additifs antimicrobiens des emballages actifs (Rai *et al.*, 2009). D'après Matsumura *et al.* (2003) deux hypothèses sont émises quant à l'activité antimicrobienne de l'argent. Tout d'abord, lorsque les cellules bactériennes sont en contact avec des ions argent ceux-ci causent de nombreux dommages dans la cellule ce qui entraîne sa mort. Dans un second temps, il existe une production d'espèces réactives de l'oxygène qui entraîne l'inhibition des enzymes de la chaîne respiratoire et une attaque de la cellule par les ions argent.

Le but de cette étude est de mettre en évidence l'activité anti-*Listeria innocua* de textiles fonctionnalisés soit par du PHMB soit par de l'argent et ce par 2 méthodes. Cette activité est mesurée sur la base de la norme ISO

20743/2005 (Anonyme, 2005) : méthode de dénombrement sur milieu gélosé, avec en parallèle l'étude de l'état physiologique des cellules grâce à la méthode d'épifluorescence.

2. Matériel et méthodes

2.1 Préparation des textiles

Les textiles utilisés sont des textiles blancs composés de 65 % coton et 35 % polyester.

Ces textiles ont été fonctionnalisés par l'IFTH (Institut-Français Textile-Habillement, Ecully (69)) dans le but de les rendre antimicrobiens : par le PHMB (Chlorhydrate de polyhexaméthylène biguanide) ou par de l'argent.

- Textile 1 : modification basée sur la base du brevet mis au point par l'IFTH n° EP 0955069, qui met en contact un agent antibactérien (le PHMB) et un agent précipitant, le complexe est ensuite fixé par foulardage. Textile testé après 1 lavage à 90°C.

- Textile 2 : traitement à base d'argent fixé au textile grâce à un liant par foulardage. Textile testé après 1 lavage à 90°C.

En parallèle, un textile témoin non traité a également été utilisé.

*2.2 Conditions de culture de *Listeria innocua**

Listeria innocua LRGIA 01 a été utilisée pour tester les différents textiles antimicrobiens. Cette souche provient d'un environnement laitier et a été choisie pour ses similarités vis-à-vis de *Listeria monocytogenes*.

1 mL de la culture de collection (conservée à -20°C) a été transféré dans 20 mL de BCC (Bouillon Cœur Cerveille) et la culture incubée 24 h à 30°C. Un isolement sur milieu TSA (Tryptone Soy Agar) est ensuite réalisé puis incubé 24 h à 30°C. Une colonie isolée a servi à ensemer 20 mL d'un nouveau bouillon BCC et incubé 24h à 30°C.

2.3 Protocole de détermination de l'activité antimicrobienne

L'activité antimicrobienne des textiles a été évaluée sur la base de la norme ISO 20743/2005 (Anonyme, 2005).

Des dilutions sont réalisées dans du TSB (Tryptone Soy Broth) 1/20^{ème} pour obtenir une suspension bactérienne de 10^5 UFC.mL⁻¹. 200 µL de cette suspension de *Listeria innocua* LRGIA 01 ont été utilisés pour ensemercer 4 éprouvettes de textiles de 0,1 g chacune. L'incubation de ces éprouvettes se fait à 30°C dans des conditions de saturation d'humidité. Les bactéries sont ensuite décrochées puis dénombrées après différents temps de contact : 1h, 4h, 8h et 24h.

Pour décrocher les bactéries, 2 éprouvettes de textiles sont placées dans un sac stomacher avec 20 mL de diluant pharmacopée (VWR, Prolabo, France) puis les sacs sont passés au stomacher 2 min par face. Après décrochage, des dilutions en série sont réalisées afin d'estimer le nombre de cellules cultivables. Le nombre d'Unité Formant Colonie (UFC) est dénombré sur TSA après 24h d'incubation à 30°C. Le dénombrement est ensuite exprimé en UFC.g⁻¹ de textile.

L'activité antibactérienne peut ensuite être calculée suivant la formule :

$A = (C^{24} - C^0) - (T^{24} - T^0)$ où C^{24} est le nombre de bactéries dénombrées après décrochage et 24h de contact, C^0 est le nombre de bactéries dénombrées au début de l'expérimentation sur le textile témoin et T^{24} et T^0 sont respectivement le nombre de bactéries après décrochage du textile traité après 24h de contact et au début de l'expérimentation. Pour qu'un textile soit dit « actif », il faut que $A > 2$.

Toutes les expériences ont été répétées trois fois et les résultats exprimés en log (UFC.g⁻¹ de textile).

2.4 Détermination de l'état physiologique des cellules

L'évaluation de l'état physiologique des cellules bactériennes se fera en utilisant un kit : le Live/Dead[®] BacLight[™] (Invitrogen, Cergy Pontoise, France). Ce kit est composé de 2 fluorochromes : le SYTO 9 et l'iodure de propidium qui sont tous 2 des colorants des acides nucléiques (respectivement vert et rouge). Ces 2 colorants diffèrent quant à leurs propriétés spectrales et leur capacité à pénétrer dans la cellule. En effet, le SYTO 9 colore toutes les bactéries que leurs membranes soient intactes ou non. *A contrario*, l'iodure de propidium pénètre seulement dans les cellules dont la membrane est lésée. Dans le cas d'un mélange des 2 colorants, on considère que les cellules vertes sont les cellules intactes (cellules viables) et que les cellules rouges correspondent aux cellules dont la membrane est endommagée (cellules non viables). Les spectres d'excitation/émission sont respectivement pour le SYTO 9 480/500 nm et pour l'iodure de propidium 490/635 nm.

Dans un premier temps un suivi de croissance sur une culture liquide de *L. innocua* a été réalisé. 1 mL d'une culture en BCC de 24 h à 30°C est transféré dans 20 mL d'un BCC frais. Une lecture de densité optique est réalisée toutes les heures avec, en parallèle, une coloration au Live/Dead[®]. La coloration est réalisée

sur 1 mL de culture en ajoutant 1 μL de SYTO 9 et 2 μL d'iodure de propidium. Ce mélange est incubé 15 minutes à température ambiante à l'obscurité. La suspension est ensuite filtrée sur membrane en polycarbonate noire de diamètre de pores 0,2 μm . La membrane est séchée à l'air puis déposée sur une lame. La préparation est observée à l'objectif X100 grâce au microscope inversé diascopique Axiovert 25 CFL (Carl Zeiss, Allemagne).

Dans un second temps, une coloration a été réalisée après décrochage des bactéries du textile. Le protocole de décrochage est identique à celui présenté dans le point 2-4. La suspension de décrochage est ensuite centrifugée 10 min à 8500 g à température ambiante. Le culot est ensuite repris dans 1 mL de Ringer (Merck, Allemagne). Le marquage à l'aide du kit Live/Dead[®] Baclight[™] est ensuite réalisé comme précédemment et la préparation est également observée à l'objectif X100. Toutes les expériences ont été répétées 2 fois et les résultats exprimés en nombre de bactérie.g⁻¹ de textile.

3 Résultats et discussion

3.1 Activité anti- *Listeria innocua* LRGA 01

Dans un premier temps, la croissance de *Listeria innocua* sur textiles traités a été comparée à la croissance sur textiles non traités. Les résultats sont présentés dans la figure 1. Cette figure montre une croissance de *Listeria innocua* sur textile non traité avec une augmentation de plus d'1 log en 24 h. Ceci met en évidence la capacité de *Listeria innocua* à adhérer et à croître sur ce type de textile non traité.

Dans le cas du textile traité 2, il y a une diminution de croissance dès 1 h de contact entre les bactéries et le textile. Après 4 h de contact, aucune bactérie n'est retrouvée. Dans le cas du textile traité 1, aucune bactérie n'a été retrouvée dès le dépôt sur textile et ce à tous les temps étudiés.

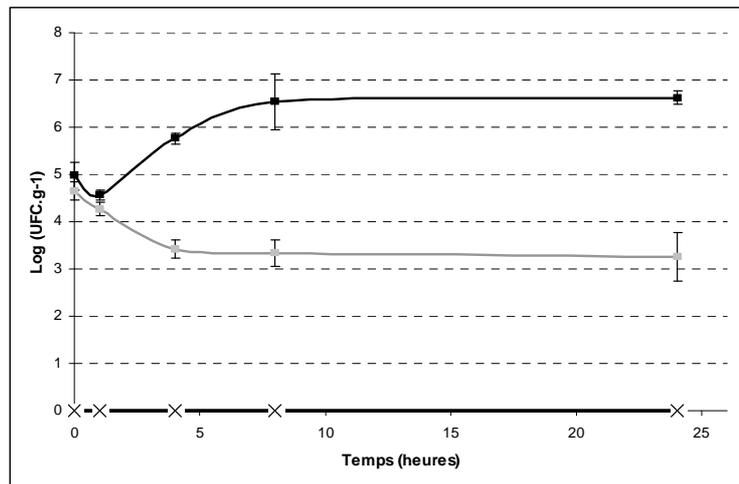


Figure 1 : Croissance de *Listeria innocua* sur textile témoin non traité (■), PHMB : textile 1 (×) et textile traité Ag (■) : textile 2.

L'activité anti-*Listeria innocua* des textiles testés peut être calculée selon la norme ISO 20743/2005.

Dans le cas du textile 1, on note une activité biocide dès la première heure. Cela met en évidence une très forte efficacité de la molécule sur *Listeria innocua*. Allen *et al.* (2006) ont démontré que pour des concentrations supérieures ou égales à 10 mg.L⁻¹, le PHMB possédait une activité biocide vis-à-vis d'*Escherichia coli*. Lee *et al.* (2004) ont également démontré que la croissance de bactéries à Gram positif et à Gram négatif était inhibée sur des gazes imprégnés de PHMB.

Pour le textile 2, on trouve une activité de 3,3. Ce textile présente donc une bonne efficacité ($A > 2$). Afin de mettre en évidence d'éventuelles bactéries viables mais non cultivables (VNC), ces mêmes textiles ont été testés grâce à un protocole d'épifluorescence.

3.2 Evaluation de l'état physiologique des cellules

Dans un premier temps, la corrélation entre couleur observée et état de viabilité des cellules a été faite. Le suivi de croissance est présenté dans la figure 2.

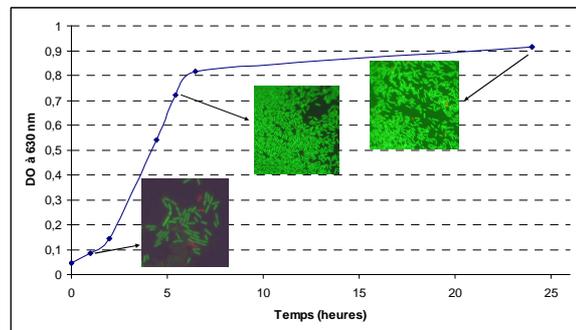


Figure 2 : Suivi de croissance sur 24 h de *Listeria innocua* en bouillon Cœur Cerveille et suivi de l'état physiologique après coloration avec le kit Live/Dead® Baclight™.

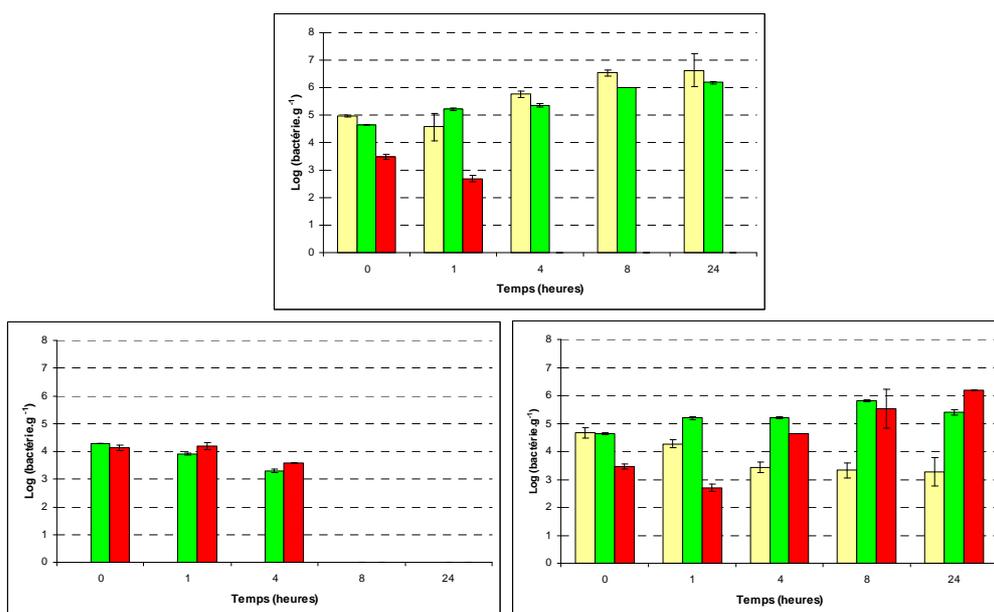
D'après le graphe on distingue donc les phases de croissance de *Listeria innocua* que sont la phase de latence entre 0 et 2 h, une phase de croissance exponentielle entre 2 et 7 h, puis une phase stationnaire jusqu'à 24 h. Des photographies des cellules ont été réalisées après coloration pour chacune des phases de croissance. En phase de latence, la majorité des cellules sont vertes avec quelques cellules rouges. Les images de la phase exponentielle sont représentées par des cellules vertes et aucune cellule rouge. On retrouve ensuite quelques cellules rouges lors de la phase stationnaire. Berney *et al.* (2007) ont démontré que les propriétés de coloration sont dépendantes du stade physiologique de la bactérie : en effet, pendant la phase exponentielle, les cellules d'*Escherichia coli* sont plus vertes que pendant la phase de latence. Les cellules de la phase exponentielle correspondent à des cellules en division cellulaire et donc physiologiquement actives. On peut donc considérer que les cellules vertes correspondent à des cellules viables.

3.3 Comparaison des 2 méthodes

Dans le but d'évaluer l'état physiologique des cellules de *Listeria innocua* après contact avec les 2 textiles traités, un protocole de coloration puis des observations au microscope à épifluorescence ont été réalisés. Après contact avec les textiles traités pendant différents temps (0, 1, 4, 8 et 24 h), les cellules bactériennes ont été décrochées puis colorées selon le protocole du paragraphe 2-4.

La figure 3 représente une comparaison des 2 méthodes de dénombrement mises en place pour le textile témoin non traité et les 2 autres textiles à visée antimicrobienne.

Figure 3 : Comparaison des méthodes de dénombrements sur TSA (■) et dénombrements au microscope à épifluorescence, bactéries viables (■) et bactéries non viables (■). Nombre de bactéries exprimé en log de bactérie.mL⁻¹ sur textile témoin non traité (A), PHMB : textile 1 (B) et Ag : textile 2 (C).



Listeria innocua est capable d'adhérer et de se multiplier sur le textile témoin non traité (A). Ceci est démontré à la fois par la méthode de dénombrement classique sur TSA mais également par le dénombrement par épifluorescence.

En effet le nombre de bactéries sur TSA n'est pas significativement différent du nombre de bactéries viables dénombrées au microscope à épifluorescence après coloration. Dans les 2 cas, il y a une augmentation d'environ 1 log en 24 h. Il faut également noter une diminution du nombre de bactéries non viables qui est expliquée par la phase de croissance : en phase de latence on retrouve quelques bactéries non viables qu'on ne retrouve pas lors de la phase exponentielle.

Sur le textile 1 (PHMB), aucune bactérie n'avait été dénombrée sur TSA. L'utilisation de la microscopie à épifluorescence nous permet ici de dénombrer jusqu'à 4 log de bactéries viables qui correspondent à des bactéries non cultivables car non retrouvées sur le milieu de culture. Des bactéries non viables sont également retrouvées. Il est à noter qu'après 8 h de contact, ni bactéries viables ni bactéries non viables ne sont observées au microscope à

épifluorescence. Dans les premières heures de contact, le PHMB induit la formation de cellules viables non cultivables, pour ensuite induire une mort cellulaire de ces cellules à partir de 8 h puisque aucune bactérie n'est observée au microscope.

Le textile 2 (Ag) est un cas intermédiaire. Le nombre de bactéries sur TSA a tendance à diminuer dans le temps mais le nombre de bactéries viables dénombrées au microscope à épifluorescence augmente jusqu'à 6 log. Le nombre de bactéries non viables diminue jusqu'à 1 h puis augmente. On retrouve donc une quantité importante de bactéries viables non cultivables après contact avec ce textile.

Il faut noter que l'augmentation du nombre de bactéries non viables donc rouges peut être soit le fait d'une mort cellulaire par manque de nutriments et/ou l'action de la molécule antimicrobienne fixée sur le textile. En effet, sur le textile témoin, on observe la présence de bactéries rouges au début de l'expérimentation et après 1 h de contact, on peut donc supposer qu'il s'agit de bactéries mortes par manque de nutriments ou issues de la culture de départ. D'après Joux *et al.* (2000), lors d'un stress, au sein d'une population, il existe une forte hétérogénéité de statuts physiologiques dans lesquels se trouvent les cellules.

Dans la nature, les microorganismes sont soumis à différents stress et sont donc capables de s'adapter. La formation de cellules viables non cultivables (VNC) est une stratégie de survie de ces dernières (Besnard *et al.*, 2002). Ces auteurs ont démontré la capacité de *L. monocytogenes* à entrer dans un stade de VNC après avoir subi différents stress environnementaux (pH, température...). Le PHMB et l'argent sont toutes deux des molécules à spectre large et vont donc faire subir un stress à *L. innocua* entraînant la formation de cellules viables non cultivables.

4. Conclusion

La comparaison de ces 2 méthodes met en évidence une évaluation incomplète de la population microbienne avec la méthode de dénombrement classique en milieu gélosé. En effet, des méthodes complémentaires comme la microscopie à épifluorescence sont indispensables pour évaluer de façon précise la population entière. Bernardeau *et al.* (2001) ont également mis en évidence cette information. La population de bactéries viables non cultivables doit être prise en considération car elle peut être la cause de contaminations croisées.

Un des avantages de la méthode d'épifluorescence est de pouvoir réaliser un suivi dans le temps de l'état physiologique des microorganismes avec un protocole simple et rapide.

Remerciements

Cette étude fait parti du projet de Recherche & Développement Actiprotex, labélisé par Techtera (pôle de compétitivité des textiles techniques et fonctionnels) financé par le Ministère Français de l'Economie, de l'Industrie et de

l'Emploi (DGCIS), la Région Rhône-Alpes, le Conseil Général 38, le conseil Général 42, le Conseil Général 01 et le Grand Lyon. Actiprotex vise à créer des produits textiles de haute technologie pour la prévention de l'adhésion des microorganismes aux textiles.

Bibliographie

Allen M. J., White G. F., Morby A. P., « The response of *Escherichia coli* to exposure to the biocide polyhexamethylene biguanide », *Microbiology*, Vol. 152, 2006, p. 989-1000.

Anonyme. Norme ISO 20743, « Détermination de l'activité antibactérienne des produits finis antibactériens », 2005.

Beresford M. R., Andrew P. W., Shama G., « *Listeria monocytogenes* adheres to many materials found in food-processing environments », *Journal of Applied Microbiology*, Vol. 90, 2001, p. 1000-1005.

Bernardeau M., Vernoux J. P., Gueguen M., « Usefulness of epifluorescence for quantitative analysis of lactobacilli in probiotic feed », *Journal of applied microbiology*, Vol. 91, 2001, p. 1103-1109.

Berney M., Hammes F., Bosshard F., Weilenmann H. U., Egli T., « Assessment and interpretation of bacterial viability by using the Live/Dead BacLight kit in combination with flow cytometry », *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 73, 2007, p. 3283-3290.

Besnard V., Federighi M., Declercq E., Jugiau F., Cappelletti J.M., « Environmental and physico-chemical factors induce VBNC state in *Listeria monocytogenes* », *Veterinary research*, Vol. 33, 2002, p. 359-370.

Chatelin R. J. R., Bourgeois M., « Procédé pour rendre biostatique ou biocide un matériau », 2006, *EP Patent* 0 955 069 A1.

Harvey J., « Occurrence of listeria species in raw milk and dairy products produced in Northern Ireland », *Journal of Applied Bacteriology*, Vol. 72, 1992, p. 119-125.

Joux F., « Use of fluorescent probes to assess physiological functions of bacteria at single-cell level », *Microbes and infection*, Vol. 2, 2000, p. 1523-1535.

Lee W., Tobias K., Bemis D., Rohrbach B., « In vitro efficacy of a polyhexamethylene biguanide-impregnated gauze dressing against bacteria found in veterinary patients », *Veterinary surgery*, Vol. 33, 2004, p. 404-411.

Matsumura Y., Yoshikata K., Kunisaki S. I., Tsuchido T., « Mode of bactericidal action of silver zeolite and its comparison with that of silver nitrate », *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 69, 2003, p. 4278-4281.

McDonnell G., Russell A. D., « Antiseptics and disinfectants: activity, action, and resistance », *Clinical Microbiology Reviews*, Vol. 12, 1999, p. 147-179.

Rai M., Yadav A., Gade A., « Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobial », *Biotechnology advances*, Vol. 27, 2009, p. 76-83.

Ramachandran T., Rajendrakumar K., Rajendran R., « Antimicrobial textiles - an overview ». *IE Journal*, Vol. 84, 2004, p. 42-47.



Elise Chadeau réalise actuellement sa thèse intitulée « Caractérisation et évaluation des fonctions antimicrobiennes de textiles, vis-à-vis de biofilms *in situ* ou *in vitro* retrouvés dans les industries agroalimentaires » sous la direction du Docteur Nadia Oulahal et du Professeur Pascal Degraeve au Laboratoire de Recherche en Génie Industriel Alimentaire (LRGIA, EA n°3733, Université Lyon 1, site de Bourg en Bresse de l'IUT Lyon 1). Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet Actiprotex, projet de Recherche & Développement collaboratif labélisé par Techtera (pôle de compétitivité des textiles techniques et fonctionnels) et cofinancé par le Ministère Français de l'Economie, de l'Industrie et de l'Emploi (DGCIS), la Région Rhône-Alpes, les Conseils Généraux de l'Ain, de l'Isère et de la Loire et le Grand Lyon. Actiprotex vise à créer des produits textiles de haute technologie pour la prévention de l'adhésion des microorganismes aux textiles.