

JNRIUT N°2 – JUIN 2011

**JOURNAL NATIONAL
DE LA
RECHERCHE EN IUT**

N°2

Publié par le laboratoire de Recherche Pluridisciplinaire
du Nord-Est de Midi-Pyrénées (IUT TOULOUSE II – Figeac)

Avant-propos

L'évolution du paysage universitaire français semble devoir conduire, à un terme court, à une reconfiguration et une redéfinition du périmètre institutionnel des Instituts Universitaires de Technologie. L'ADIUT et l'UNPIUT ont, dans ce cadre, fait le choix d'une démarche volontariste et prospective visant à permettre l'émergence de propositions constructives et représentatives des débats et prises de position au sein de chacun des 115 IUT. Les IUT souhaitent pouvoir continuer à faire la démonstration de leur efficacité en tant qu'outil de service public ayant pour vocation de contribuer au développement de la recherche, de l'innovation et des partenariats technologiques. Cette vocation, à laquelle les IUT répondent depuis 45 ans, doit s'inscrire dans un cadre rénové et permettant de répondre aux problématiques suivantes :

- assurer la pérennité du caractère universitaire de nos instituts,
- gérer les interfaces entre IUT et laboratoires de rattachement de nos enseignants chercheurs,
- renforcer la culture scientifique de l'ensemble des catégories de personnels et leur donner les moyens de participer aux projets définis.

Tout particulièrement, une attention renforcée doit être portée aux IUT de petite taille et des villes moyennes et petites qui ne disposent souvent que de petites équipes de recherche, parfois éclatées entre disciplines diverses, et fortement impliquées dans les activités de pilotage de leurs IUT. Tant en termes institutionnels que de performance scientifique, les éléments de réflexion suivants doivent être pris en compte tant par nos instituts et ses structures de coordination nationales que par les instances de tutelle :

- privilégier les initiatives scientifiques locales fédérant les enseignants chercheurs du site et s'inscrivant dans une logique forte de partenariat technologique avec l'environnement industriel, économique et social local,
- limiter les thématiques de recherche locales à un nombre réduit afin de permettre de répondre à l'enjeu décrit au point précédent et d'éviter une « évaporation individuelle » des enseignants chercheurs vers des laboratoires divers,
- inscrire ces activités de recherche dans une logique de site : les IUT ont vocation, dans la perspective de constitution de "plateformes de compétences" voire de "conseils de site", à s'affirmer en chef de file de projets de partenariats technologiques impliquant la mobilisation des compétences et plateaux techniques des lycées, la coopération avec les bureaux d'études des partenaires industriels et le soutien des collectivités locales dans une logique d'aménagement du territoire,
- favoriser la reconnaissance de ces équipes de site en tant qu'antennes délocalisées de laboratoires reconnus et militer pour la mise en place de dispositifs spécifiques d'évaluation.

Ce journal, désormais inscrit dans le paysage de la vie des IUT, est un élément de démonstration du dynamisme scientifique et de l'efficacité de notre réseau. Je tiens à saluer l'action menée par notre collègue de l'IUT de Figeac, Thierry Simon, qui, à force de persuasion et de travail, a su conduire à son terme la composition et la publication de ce nouveau numéro du JNRIUT auquel je souhaite longue vie.

Olivier DROUARD-PASCAREL
Directeur de l'IUT Toulouse II Figeac

Les IUT, composantes technologique des universités, présents dans plus de 200 villes en France, sont porteurs de recherche sous toutes ses formes. Les enseignants-chercheurs des IUT mènent leurs activités de recherche soit dans un laboratoire relevant de leur IUT, soit dans un laboratoire hébergé dans d'autres composantes de l'université rattachés à d'autres organismes (CNRS, INSERM, etc.) et contribuent ainsi à l'excellence de la recherche universitaire.

Au moment où le positionnement des IUT au sein des universités est un enjeu majeur pour le futur, les IUT ont réaffirmé lors des Etats Généraux de mai 2010, que le lien Formation – Recherche constitue un ancrage fondamental qui permet :

- de contribuer à l'évolution des savoirs par le développement de la recherche,
- de garantir l'actualisation des connaissances et le haut niveau de la formation technologique,
- d'élaborer des compétences d'autonomie chez les diplômés par la méthodologie de travail universitaire.

De plus, de part leur maillage territorial et leur proximité avec le tissu économique, les IUT jouent un rôle privilégié dans le domaine de l'innovation et du transfert de technologie. Très souvent appuyées sur des plateformes technologiques, les équipes d'enseignants des IUT conduisent avec les entreprises des projets d'innovation et de transfert qui contribuent, en lien avec les politiques régionales, au développement économique des territoires.

Le Colloque National de la Recherche en IUT (CNRIUT) se déroule chaque année depuis 17 ans dans un IUT différent. Ce colloque a pour objectif de promouvoir et diffuser les résultats de recherche réalisés par les enseignants-chercheurs, enseignants, ingénieurs et doctorants des IUT. La pluridisciplinarité des IUT et la diversité des activités recherche de leurs chercheurs permet de présenter des travaux relevant à la fois des sciences et techniques de l'ingénieur ainsi que des sciences humaines et sociales. Cette manifestation est également une opportunité pour échanger sur les pratiques et les conditions de recherche en IUT et pour initier de nouvelles collaborations entre partenaires universitaires et industriels.

Le Journal National de la Recherche en IUT a pour objectif de publier des articles présentés lors du CNR. Malgré la qualité de ses publications, la diffusion du JNR est encore bien trop confidentielle. Nous comptons sur vous pour le faire plus connaître et nous vous donnons rendez-vous l'année prochaine pour le prochain numéro.

Christelle FARENC, Coordinatrice de la commission Recherche de l'ADIUT et Serge DULUC, Vice-président Recherche de l'ADIUT

Chères collègues, chers collègues,

Je vous dois quelques explications sur la composition du n° 2 du JNRIUT. Pour rester dans l'esprit d'un journal pluridisciplinaire vous trouverez des articles en lien avec les différentes disciplines enseignées dans les différentes spécialités de DUT et en lien avec les différentes spécialités des sections CNU de rattachement des enseignants chercheurs. Comme pour le n° 1 les articles sont issus du CNRIUT de l'année précédente. Cependant l'article de Thrycia TITE, le premier dans la pagination, est un article sélectionné lors du congrès de LILLE mais arrivé après le dépôt du journal chez l'imprimeur. Pour réparer ce manque cet article est publié dans ce numéro. Plusieurs articles ont été remaniés, d'autres sont publiés tels qu'ils ont été soumis au CNR d'Angers, selon le choix des auteurs.

La sélection des autres articles s'est réalisée autour de recommandations des modérateurs de session du CNRIUT et des enseignants chercheurs du Laboratoire de Recherche Pluridisciplinaire du nord est de Midi-Pyrénées (LRPmip), laboratoire de l'IUT Toulouse II Figeac, Patricia GONTIER (section CNU 05), Cécile VACHEE (74), Denis BORIES (06), Mohammed CHEIKH (60), Christophe DANSAC (16), Romain DUMAS (01), Etienne VALDES (60), membre du LRPmip, que tous soient remerciés pour leur travail.

Je voudrais particulièrement remercier Louis DAVAL et Viraya-Judith TAN qui se sont occupés de la maquette du journal, mise en page, photos, relecture des textes, etc., tout ce qui est nécessaire pour assurer la qualité du document publié, sans eux ce numéro ne pourrait exister.

Dans ces temps difficiles de positionnement des IUT dans la formation universitaire de technologie, souhaitons-nous bon courage pour maintenir une activité de recherche en lien avec les milieux économiques et au sein de nos IUT. N'oublions de faire fonctionner le réseau garant d'une cohérence nationale.

Thierry SIMON
Directeur de publication

SOMMAIRE

<i>Supply Chain Management : Une Stratégie pour les Petites et Moyennes Entreprises des Départements Français d'Amérique? L'exemple de la distribution de produits pharmaceutiques</i>	Page 1
Thrycia TITE	
<i>Commande d'un actionneur électrique par communication sans fil Zigbee</i>	Page 26
Jean-François Llibre, Beñat Arruti Gesalaga, Yoan Clouet	
<i>Générateur sinusoïdal biphasé contrôlé numériquement</i>	Page 38
Jean Bayard, Anne Marie Bayard	
<i>Vers une nouvelle interprétation de la procédure d'acquiescement répété</i>	Page 49
Séverine Halimi-Falkowicz, Marie Marchand, David Vaidis, Nicolas Guéguen	
<i>Optimisation dimensionnelle d'un robot de télé-échographie</i>	Page 58
Laurence Nouaille, Natalie Smith-Guerin, Pierre Vieyres et Gérard Poisson	

Caractérisation du frottement dans une large gamme de vitesses Page 75

Jean Jacques ARNOUX, Guy SUTTER, Gautier LIST

Quartiers dits sensibles et transactions individus-environnements: vers le Sentiment d'Injustice Subie Page 87

Azeddine Goutas, Nasrédine Goutas

Théorie comptable et gouvernance de l'entreprise Pour un dépassement des visions actionnariale et partenariale Page 102

Michel Baupin

La GAPDH associée à la paroi de Lactobacillus plantarum 299v : étude de son exportation à la surface de la bactérie Page134

Naima Saad, Maria Urdaci, Chantal Jayat-Vignoles, Philippe Bressollier, Stéphane Chaignepain, Jean-Marie Schmitter

Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs Page 161

Mohamed Ansoumane Camara, Pierre-Olivier Logerais, Olivier Riou, Jean-Félix Durastanti

Supply Chain Management : Une Stratégie pour les Petites et Moyennes Entreprises des Départements Français d'Amérique?

L'exemple de la distribution de produits pharmaceutiques

Thrycia TITE

IUT GLT Evry

t.tite@iut.univ-evry.fr

RESUMÉ : *Face à l'intensification de la concurrence et la volatilité de la demande, les entreprises prestataires de service ont dû appliquer de nouvelles techniques de management leur permettant d'accroître la valeur ajoutée des prestations fournies et d'améliorer leurs performances. C'est ainsi que le secteur de la distribution pharmaceutique s'est orienté au cours de ces dernières années vers cette stratégie. Les pressions exercées sur les marges, non seulement par les concurrents, mais également par la réglementation en vigueur ont ainsi obligé les entreprises de ce secteur à optimiser les flux matériels, informationnels et financiers tout au long de leurs chaînes de valeurs. Les entreprises de distribution de produits pharmaceutiques situées dans les Départements Français d'Amérique (DFA) n'échappent pas à cette évolution. Cependant, le processus d'optimisation semble soumis à davantage de contraintes dans ces départements, ce qui rend plus difficile l'application de cette stratégie. A travers l'exemple de la distribution pharmaceutique, et plus particulièrement l'activité de grossiste-répartiteur, cette communication s'interroge d'une part sur les enjeux de la mise en œuvre d'un SCM pour les entreprises de ce secteur d'activité et, d'autre part, sur les contraintes spécifiques auxquelles elles sont confrontées. De façon plus globale, en montrant que le SCM est une stratégie applicable et efficiente dans les DFA, cette communication offre des perspectives aux entreprises de ces départements qui hésitent encore à s'engager sur cette voie.*

MOTS CLÉS : *Supply Chain Management, Départements Français d'Amérique, Pharmacies, Grossiste-répartiteur*

Introduction

La distribution de produits pharmaceutiques représente une activité très spécifique puisque tous les médicaments doivent être disponibles dans les plus brefs délais au comptoir de toutes les pharmacies. Cette contrainte implique un circuit de distribution très sophistiqué qui, depuis les sites de fabrication, passe par différentes opérations permettant la livraison du produit à l'officine avec l'assurance du maintien de ses qualités thérapeutiques et dans les meilleurs délais. De ce fait, le Supply Chain Management, qui consiste en l'optimisation des flux matériels, informationnels et financiers tout au long de la chaîne d'approvisionnement globale s'est progressivement imposé comme une stratégie indispensable pour assurer le maintien de la rentabilité de ces entreprises de distribution. Les entreprises situées dans les Départements Français d'Amérique ont également opté pour l'application de cette stratégie. Cependant, il s'avère que le processus d'optimisation est soumis à davantage de contraintes dans ces départements que dans ceux situés en France métropolitaine. A travers l'exemple d'un grossiste-répartiteur à la Martinique, il s'agira d'explicitier le concept de SCM dans le secteur de la répartition pharmaceutique et de mettre en évidence les contraintes spécifiques auxquelles ces départements sont confrontés. Nous étudierons dans une première partie les enjeux du SCM pour les entreprises intervenant dans la distribution du médicament, puis nous analyserons plus concrètement la mise en œuvre du SCM chez un grossiste répartiteur.

1. Les Enjeux du Supply Chain Management dans la Distribution du Médicament

1.1. La distribution du médicament, une activité de service très spécifique

Si la distribution du médicament a quelques similitudes avec celle d'autres produits de grande consommation comme la nécessité de disposer d'entrepôts tout au long du circuit, cette activité reste très spécifique. La nature même du produit distribué constitue l'une de ces spécificités. Ainsi, les médicaments peuvent être dangereux, soit par leur teneur en principes actifs, soit par leur nature même (médicaments

radioactifs, bouteilles de gaz à usage médical). Cela nécessite le respect de précautions au niveau de la manipulation de ces produits et au niveau de leur mise à disposition au public. Par ailleurs, les médicaments sont des produits à usages thérapeutiques et doivent dès lors faire l'objet, pour des raisons de santé publique, d'une attention très particulière. Par exemple pour être commercialisables, ils doivent tous bénéficier de l'AMM, l'autorisation de mise sur le marché, délivrée en France par l'Agence française de sécurité sanitaire des produits de santé (AFSSAPS). L'obligation stricte de respecter les normes d'hygiène et de sécurité et d'assurer la disponibilité de tous les médicaments au comptoir de toutes les pharmacies constituent autant de pressions qui s'exercent sur les acteurs de la distribution de produits pharmaceutiques.

Ces acteurs appartiennent à une chaîne qui traite des volumes très importants de produits très variés destinés à améliorer la santé. Cette chaîne doit donc être sécurisée d'amont en aval, du fabricant au détaillant en passant par le grossiste. Au début de la chaîne de distribution se trouvent les laboratoires pharmaceutiques qui fabriquent et distribuent les produits aux hôpitaux, cliniques, grossistes, établissements pharmaceutiques et médecins. La distribution du médicament au détail est assurée par la pharmacie soit d'officine soit hospitalière et la distribution du médicament en gros est assurée par des grossistes-répartiteurs qui achètent et livrent à chaque pharmacie. Ces derniers méritent une attention particulière en raison du rôle central qu'ils remplissent dans la distribution pharmaceutique.

1.2. Les grossistes-répartiteurs pharmaceutiques, des acteurs essentiels de la distribution

La répartition pharmaceutique occupe une position stratégique au cœur du circuit de distribution du médicament puisqu'elle est l'interface habituelle entre les laboratoires et les pharmacies d'officine. Les grossistes-répartiteurs achètent aux laboratoires pharmaceutiques des produits qu'ils gèrent et stockent dans des établissements avant de les livrer aux pharmacies d'officine. Ils mettent ainsi à disposition des officines trois milliards de produits environ chaque année (médicaments, dispositifs médicaux, parapharmacie...) dans les plus brefs délais et au moindre coût et ce, en respectant des obligations de service public. Pour cela, ils emploient 15 000 personnes sur l'ensemble du territoire français (départements d'outre-mer compris) parmi lesquelles 1 000 cadres, 600 agents de maîtrise, 320 informaticiens, 1 100 téléphonistes, 6 300

préparateurs de commande et magasiniers ainsi que 3 500 chauffeurs-livreurs qui parcourent plus de 165 millions de kilomètres par an.

Le marché de la répartition pharmaceutique en France métropolitaine est constitué principalement de deux groupes installés sur l'ensemble du territoire -OCP et Alliance Santé-, d'un réseau national CERP composé de 4 entreprises -CERP Rouen, CERP Rhin Rhône Méditerranée, CERP Lorraine et CERP Bretagne Nord-, d'une entreprise multirégionale, PHENIX Pharma et de différentes entreprises locales. L'activité de répartition constitue une branche professionnelle spécifique, qui appartient à la fois à deux secteurs, le commerce de gros et la pharmacie.

Les grossistes-répartiteurs appartiennent à une catégorie particulière de grossistes. Ils occupent une place particulière dans la distribution en France, par leur savoir-faire, le rôle essentiel qu'ils remplissent, les réglementations propres qui les régissent, le système concurrentiel dans lequel ils vivent. Le service rendu par les grossistes-répartiteurs permet à toutes les pharmacies d'officine de bénéficier par tous les temps d'un approvisionnement sûr et rapide. Leurs établissements disposent comme ceux des autres grossistes d'une large gamme de moyens d'exploitation (moyens de communication, de réception et de stockage des produits, de gestion de stocks, de préparation de commandes, de livraisons...).

Les grossistes-répartiteurs, proches de l'industrie et du commerce par la taille de leurs entreprises et par leurs méthodes, sont également très proches des pharmacies d'officine. Ils connaissent tous les produits présentés sous des milliers de références et disposent de chiffres leur permettant d'évaluer avec précision l'évolution de la consommation pharmaceutique. Comme le pharmacien d'officine, les grossistes-répartiteurs doivent être propriétaires des médicaments dont ils assurent la distribution. Ils sont les principaux clients des laboratoires pharmaceutiques et constituent la principale source d'approvisionnements des pharmacies d'officines. De plus, ils relèvent du droit particulier des établissements pharmaceutiques.

Le code de la santé publique fixe les modalités d'exercice de l'activité de grossiste-répartiteur. Chaque établissement doit justifier d'une autorisation d'ouverture auprès de l'AFSSAPS et doit déclarer le territoire sur lequel il exerce son activité de répartition. Toute commune dans laquelle l'établissement dessert habituellement au moins une officine fait partie de ce territoire. L'établissement doit disposer en permanence d'un assortiment de médicaments correspondant à au moins

90 % des références effectivement exploitées en France avec un stock correspondant à 15 jours de vente. Il doit être en mesure de livrer, dans les 24 heures suivant la réception de la commande, tout médicament faisant partie de son assortiment et doit être capable de livrer n'importe quel médicament quelle que soit l'officine qui le lui demande. En outre, les répartiteurs sont tenus de posséder 90 % des spécialités pharmaceutiques exploitées en France alors que la majorité des médicaments se vend à moins d'une unité par mois et par officine (75 %) et seuls 2% se vendent à plus de dix unités. L'activité de répartition pharmaceutique représente ainsi l'interface indispensable qui permet à la fois d'optimiser les stocks et d'assurer la livraison des produits tout en respectant les contraintes de temps et de qualité.

Par ailleurs, les pouvoirs publics imposent les prix d'achat et plafonnent les marges pour les spécialités médicamenteuses (15% en moyenne), alors que ces produits représentent en moyenne 86% des ventes des grossistes-répartiteurs. Les remises offertes aux pharmacies d'officine sur les médicaments remboursables sont également plafonnées à 2,5 %. De plus, les grossistes-répartiteurs n'ont le choix ni de leurs fournisseurs (collection imposée) ni de leurs clients, alors que les pharmacies d'officine quant à elles peuvent choisir leurs fournisseurs. Ainsi, il ne peut exister aucune relation d'exclusivité entre les grossistes et les pharmaciens. Ces derniers peuvent en effet s'approvisionner aussi bien auprès des différents grossistes-répartiteurs implantés dans la région qu'auprès des mandataires de fabricants qui vendent directement les produits aux pharmacies d'officine. Etant donné que tous les grossistes-répartiteurs proposent les mêmes produits au même prix, le choix d'un concurrent plutôt qu'un autre dépendra des conditions d'installations, de la qualité du service ou encore de la mise à disposition de services comme les outils d'aide à la pharmacovigilance, le merchandising, l'informatique officinale, etc.... En définitive, la réglementation limite très fortement la concurrence par les prix, la seule différenciation, très limitée, porte sur la qualité des services rendus. Cela étant, comme la différence au niveau des services est généralement très faible, les officines remettent rarement en cause leur répartiteur.

L'activité de répartition pharmaceutique est d'autant plus spécifique que le marché se caractérise par de fortes barrières à l'entrée. Les laboratoires fixent aux répartiteurs des quotas de livraisons sur certains médicaments qui correspondent à la part de marché du répartiteur sur l'année précédente. Ce système rend plus difficile l'installation de nouveaux établissements et réduit les possibilités d'évolution des parts de marché des établissements existants. Les coûts fixes sont en outre très élevés. Les entreprises doivent réaliser des investissements lourds en

moyens d'exploitations (matériel, entrepôts, matériel de stockage, triage et transport, obligations de stock et de largeur de gamme). La création d'un entrepôt correspond à une mise de départ comprise entre trois millions et dix millions d'euros, amortissable sur trois à cinq ans. Un nouvel établissement aura des difficultés à dégager dans un délai raisonnable un volume d'affaires suffisant pour atteindre le point mort, ce d'autant que l'activité nécessite des besoins importants en trésorerie et en fonds de roulement. Le répartiteur doit financer 15 jours de stocks et 45 jours en moyenne de crédit alors que les laboratoires se font régler à 30 jours en moyenne.

En conclusion, les grossistes-répartiteurs sont dans l'obligation de disposer d'un stock de 90 % des médicaments, de livrer en 24 heures, de garantir la qualité des médicaments alors que leurs marges sont limitées. De plus, compte tenu des caractéristiques économiques de ce marché – coûts fixes élevés et marge limitée- toute perte de client est une menace pour l'équilibre financier d'un établissement. Pour maintenir leurs parts de marché, les entreprises doivent à la fois optimiser leurs flux pour réduire les gaspillages et pertes de valeurs du produit et proposer un niveau de service aussi élevé que leurs concurrents.

1.3. Légitimation et Enjeux du Supply Chain Management dans l'activité de la répartition pharmaceutique

Face aux spécificités du secteur de la distribution pharmaceutique, les entreprises n'ont d'autres choix pour maintenir ou accroître leurs parts de marché que d'optimiser leurs flux matériels, informationnels et financiers tout au long de leurs chaînes de valeur et d'améliorer le service rendu aux pharmacies d'officine. L'adoption d'une démarche de Supply Chain Management (SCM) permet d'optimiser la gestion des approvisionnements, des stocks, de l'entreposage, et du transport ainsi que la préparation de la commande. Elle permet également la mise à disposition du produit attendu par le client dans les meilleurs délais et dans le respect de la qualité. Le SCM favorise la réduction des gaspillages et des pertes de valeur du produit tout au long de la chaîne d'approvisionnement allant du fournisseur du fournisseur au client du client. Les performances de l'entreprise s'en trouvent améliorées, à la fois par la diminution des coûts (les stocks peuvent par exemple baisser de 20 à 50 % selon le type de produit), et par l'élévation du niveau de service rendu à la clientèle.

Le SCM remet en cause les restrictions traditionnelles à la circulation des informations et suppose une profonde transformation des modes d'organisation. De ce fait, sa mise en place requiert l'adhésion des salariés pour être pleinement efficace. L'entreprise qui s'engage dans une démarche de SCM doit avant tout prendre en compte l'ensemble des acteurs qui participent à l'application de cette stratégie. Le personnel contribue à travers ses actions à faire progresser l'entreprise dans le sens d'une adaptation permanente de l'offre à la demande en termes de coûts, de qualité, de délais et de services associés aux produits. Les hommes doivent s'intéresser au système de pilotage stratégique des activités dans lesquels ils se trouvent impliqués en développant des connaissances qui soutiennent leur capacité de réflexion, à la fois critique et constructive. La modélisation de l'organisation par activités permet d'identifier tous les acteurs intervenant dans la réalisation des objectifs stratégiques et de construire pour chaque catégorie d'acteurs, en fonction de leur implication, une politique de gestion des ressources humaines en cohérence avec le développement d'un processus coopératif dans les organisations.

La démarche de SCM, pour aboutir, nécessite la coordination plus ou moins formalisée entre les acteurs de la chaîne. Les flux d'informations jouent un rôle majeur dans la gestion de la chaîne logistique à la fois en fournissant à tous ses acteurs des informations en temps réel dans les plus brefs délais et en permettant la coordination des flux physiques tout au long de la chaîne d'approvisionnement. Les technologies de l'information et de la communication jouent un rôle essentiel dans la mise en œuvre du SCM. D'une part en tant que moyen d'intégration et d'accélération des flux d'information en interne et en externe (progiciels de gestion intégrée de type ERP), d'autre part, en tant qu'outils d'optimisation et d'aide à la décision grâce à la simulation (progiciels dédiés de SCM comme Manugistics, Numetrix). Les systèmes d'information donnent une image de l'entreprise à la fois spatiale et temporelle. Ils permettent également de capter l'information pertinente, de la stocker, de la traiter, de la restituer et de la transférer. Les opérations doivent être exécutées rapidement pour permettre, d'une part, une meilleure qualité des décisions logistiques et, d'autre part, des rétroactions capables de corriger les perturbations éventuellement subies par l'entreprise. Communiquer et échanger des informations dans l'entreprise et avec les autres entreprises se révèle indispensable dans le pilotage des flux logistiques. En effet, il serait difficile autrement de *"prévoir et d'organiser la circulation des produits, déclencher le flux et synchroniser les opérations qui concrétisent la chaîne logistique, suivre le déroulement des opérations et réagir face aux aléas"* (N. Fabbe-Costes, 1997, p.114).

L'industrie pharmaceutique doit tenir compte des enjeux spécifiques dans sa démarche de logistique globale. Compte tenu des spécificités réglementaires et des contraintes particulières de la production des médicaments, l'amélioration de la gestion des stocks ne vise pas le "zéro stock", mais plutôt l'optimisation permettant d'éviter les ruptures d'approvisionnement. Le nombre impressionnant de références et l'activité saisonnière de nombreux médicaments rendent la gestion des stocks particulièrement complexe, justifiant ainsi les efforts de rationalisation que permettent les méthodes de SCM. Pour atteindre un niveau de satisfaction client élevé, le principal indicateur qui doit être mis en place dans le cadre d'une démarche de SCM n'est plus le taux de disponibilité, ni le taux de rupture, mais le taux de service. De nombreux indicateurs de suivi doivent accompagner la démarche de SCM. Préalablement à la mise en place du SCM, les grossistes-répartiteurs doivent harmoniser leurs systèmes d'information ou mettre en place des interfaces efficaces permettant à l'ensemble des entités de la chaîne de communiquer. Les projets de SCM imposent en outre une transformation des modes d'organisation interne et externe des laboratoires. La réussite de tels projets passe par la mise en place de structures transversales, afin de faciliter la circulation des flux d'informations.

Concernant la rationalisation des approches logistiques, toutes les entreprises n'ont pas atteint le même stade d'évolution. Le degré d'avancement et les modes opérationnels (internalisation ou externalisation des moyens logistiques, systèmes informatiques implantés, progiciels de gestion intégrée) divergent selon les sociétés. Face au SCM, les acteurs de la pharmacie peuvent ainsi être classés en différentes catégories. Certains groupes, minoritaires, ont véritablement intégré une logique de SCM, avec des projets qui arrivent à terme. Ils se concentrent sur leur cœur de compétences et opèrent un processus de sélection de leurs sous-traitants. D'autres entreprises se situent dans la phase d'intégration du Supply Chain Management et se focalisent surtout sur la réduction des coûts.

En conclusion, le Supply Chain Management consiste aujourd'hui en une collection de solutions dédiées en termes de prévisions, de planification des stocks, de planification des transports, d'ordonnancement sachant que l'une des principales difficultés est d'assurer la coordination et la cohésion d'ensemble¹.

¹ Il existe de nombreuses références sur le Supply Chain Management. Parmi elles, R.H. Ballou (1992), M. Aurifeille *et al.* (1997), M. Cooper (1997), J. Colin *et al.* (2000), R. Duane Ireland *et al.* (2002).

2. La pratique du Supply Chain Management dans le secteur de la distribution pharmaceutique des Départements Français d'Amérique

2.1. La distribution pharmaceutique dans les Départements Français d'Amérique

2.1.1. Présentation du marché de la distribution pharmaceutique dans les DFA

En Guyane, le marché de la répartition pharmaceutique se partage entre trois grossistes: la Société de Pharmaciens Guyanais (SPG) avec 40% des parts de marché; la CERP Guyane et la COPHAGUY qui détiennent chacune 30% des parts de marché. La COPHAGUY (Confraternelle de Pharmaciens Guyanais) est une filiale de Bureau Afrique Antilles qui fournit des médicaments sur le territoire africain et envisage d'implanter une filiale en Guadeloupe. Pour l'instant, le marché guadeloupéen n'est couvert que par le GPG, Groupement des Pharmaciens de la Guadeloupe qui détient 37% des parts et par la SOPHARMA dont les parts s'élèvent à 63%. Cette dernière appartient à une filiale de Pinault-Printemps-Redoute, la Continental Import Export, de même que la SPG et la SOPHARMA Martinique. Le marché de la distribution pharmaceutique de la Martinique est un marché duopolistique sur lequel deux entreprises évoluent la SOPHARMA qui détient 64% du marché, le reste étant détenu par la CERP Martinique. La création de la CERP s'est effectuée parallèlement à la cessation progressive de l'activité de la Coopérative Pharmaceutique Martiniquais (CPM). De ce fait, durant une courte période transitoire, la SOPHARMA était l'unique fournisseur de toutes les pharmacies d'officine de la Martinique.

2.1.2. Présentation d'un grossiste-répartiteur implanté à la Martinique: la Confraternelle Exploitation Répartition Pharmaceutique (CERP)

La CERP Martinique, Confraternelle d'Exploitation et de Répartition Pharmaceutique, créée en 1992, est une société anonyme à directoire et conseil de surveillance au capital de 2 100 000 €. Les actionnaires principaux sont, dans l'ordre, la Société de Pharmaciens Martiniquais (SPM) (60%) et par la CERP Rouen (20%), la CERP

Lorraine (10%) et la CERP Rhin Rhône Méditerranée (10%). L'activité de la CERP Martinique se compose principalement de spécialités médicales, de médicaments OTC, de produits parapharmaceutiques et dans une moindre mesure d'une activité de maintien à domicile (vente ou location de matériels d'hospitalisation). La base de produits regroupe environ 100 000 références dont 10% sont tenus en permanence par la CERP, les autres références pouvant faire l'objet d'une commande spéciale. La société s'approvisionne auprès de 400 fournisseurs environ, répartis majoritairement sur le territoire français. Sa clientèle est composée à 80% des 140 pharmacies d'officine que compte la Martinique, certaines pharmacies étant à la fois clientes et actionnaires. Toutes les officines de la Martinique s'approvisionnent généralement auprès des deux grossistes-répartiteurs. Par commodité, celles qui s'adressent prioritairement à la CERP sont nommées "clients privilégiés" et les autres, les "clients secondaires". Le reste de la clientèle de la CERP est constitué de dentistes, et épisodiquement des hôpitaux et cliniques. Ces derniers s'approvisionnent à l'accoutumée directement auprès des laboratoires et font appel à la CERP uniquement pour des livraisons de lots trop petits pour être acheminés par leurs circuits de distribution traditionnels.

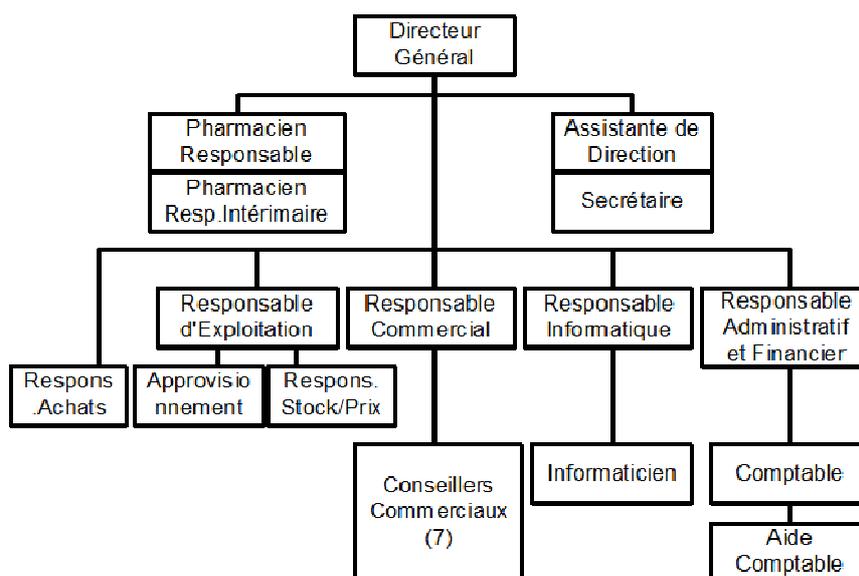
2.1.3. Les Ressources Humaines de la CERP et leurs gestions

La CERP dispose d'un effectif de 48 personnes qui vont participer à la maîtrise de la gestion des stocks, de la conservation et de la livraison des médicaments à chaque officine dans des conditions où la qualité et la sécurité de chaque produit sont garanties. Le personnel est ainsi investi au service du médicament, du client pharmacien d'officine et du patient. Le directeur de la CERP Martinique est responsable de la gestion de l'établissement et de la motivation de ses collaborateurs. Il se charge d'optimiser les performances de son établissement au niveau commercial, de ses charges d'exploitation, de ses charges sociales et de sa productivité. Le pharmacien responsable et le pharmacien responsable intérimaire sont garants du respect de l'application de la réglementation au niveau des conditions de stockage, de la sécurité des locaux de stockage, du niveau de compétence du personnel et des conditions de livraison des médicaments. Ils doivent en outre promulguer des conseils aux clients (technique, création ou transfert d'officine...). Le responsable d'exploitation organise et contrôle les approvisionnements, la préparation des commandes, la livraison et le retour des marchandises. Il anime les équipes, gère l'organisation du travail et le management des collaborateurs de la CERP dans un souci de productivité et de

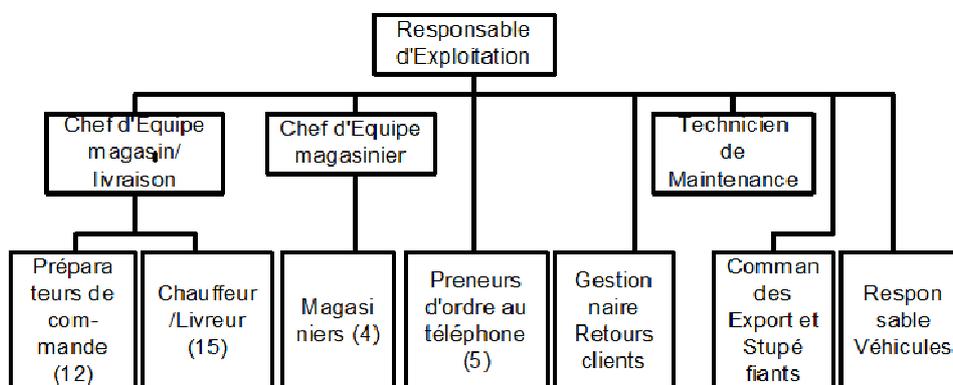
développement des compétences de chaque membre du personnel. Le responsable commercial organise, anime et dynamise la force de vente de l'entreprise et supervise la politique commerciale de la CERP. Le responsable informatique réalise des projets informatiques et des procédures d'exploitation. Elle garantit la mise à jour des logiciels d'exploitations, du matériel et du site Internet de la CERP. Le responsable administratif et financier assure la coordination et la régulation des comptabilités et gère administrativement le personnel.

Schéma 1. L'organisation de la CERP

Organigramme Services Administratifs



Organigramme Services Exploitation



Tout le personnel de la CERP travaille en étroite collaboration afin d'optimiser l'ensemble de la chaîne logistique, ce qui se traduit par une forte coopération entre les membres du personnel, aussi bien entre personnel de même niveau hiérarchique que de niveaux différents. Si les ressources humaines semblent constituer un obstacle certain à la mise en place d'un Supply Chain Management dans les entreprises où une gestion traditionnelle a largement dominé jusqu'ici, résultat que confirme une étude préliminaire sur les entreprises martiniquaises, cette situation n'est pas celle de la CERP. Cette entreprise a dès le départ adopté une gestion intégrée de sa chaîne de valeur. De ce fait, les employés n'ont pas eu à subir de modification majeure dans l'organisation de leur travail. Les modifications apportées comme par exemple l'installation de douchettes informatisées ont généralement été bien appréhendées. Dans le cas contraire, la direction de la CERP reste à l'écoute des doléances de son personnel et recherche une solution optimale pour tous. Ainsi, au cours des douze années d'activité de la CERP à la Martinique, seule une grève sans grande conséquence pour l'activité en elle-même a été déplorée. En 2002, les chauffeurs-livreurs mécontents de l'extension de l'activité de la CERP aux matériels de maintien à domicile ont refusé d'effectuer leurs livraisons. Les négociations ont été immédiatement entamées. Aussi, après un arrêt de travail total de seulement deux heures, la CERP a pu reprendre le cours normal de ces activités, en échange de l'instauration d'une prime individuelle pour chaque matériel de "maintien à domicile" livré.

De façon générale, un intéressement est pratiqué dans l'entreprise pour motiver les salariés et pour qu'ils se sentent investis dans les résultats de l'entreprise. La CERP offre deux primes, l'une trimestrielle et l'autre globale. La prime globale est offerte à partir d'un certain seuil du chiffre d'affaires. Cette prime est ensuite répartie entre les membres du personnel pour 60% en fonction du salaire de base et pour 40% en fonction du temps effectif de travail. La prime trimestrielle est allouée par service et chaque responsable de service répartit cette prime entre ses collaborateurs en fonction de la productivité de chacun. Cette forme d'intéressement permet à la CERP de sanctionner l'absentéisme des salariés.

Des réunions sont régulièrement organisées entre la direction et les représentants du personnel de façon à informer le personnel des éventuels changements au niveau des planifications opérationnelle et tactique. Chaque année, une réunion est organisée avec l'ensemble du personnel au cours de laquelle les salaires peuvent être éventuellement

renégociés. Le personnel est informé des orientations stratégiques et de la situation de la CERP au niveau de son chiffre d'affaires. Ces réunions favorisent la création de liens entre les membres de l'entreprise et entretiennent l'esprit d'équipe.

Les technologies de l'information et de la communication favorisent la circulation et l'échange d'informations entre le personnel. Les échanges d'information demeurent toutefois très informels. Ainsi, les chauffeurs-livreurs, proches de la clientèle, sont généralement les premiers informés d'éventuels changements affectant les officines, comme, par exemple, un nouveau positionnement du concurrent. Dans ce cas, ils transmettent directement les informations au personnel concerné.

2.1.4. Les technologies de l'information et de la communication à la CERP

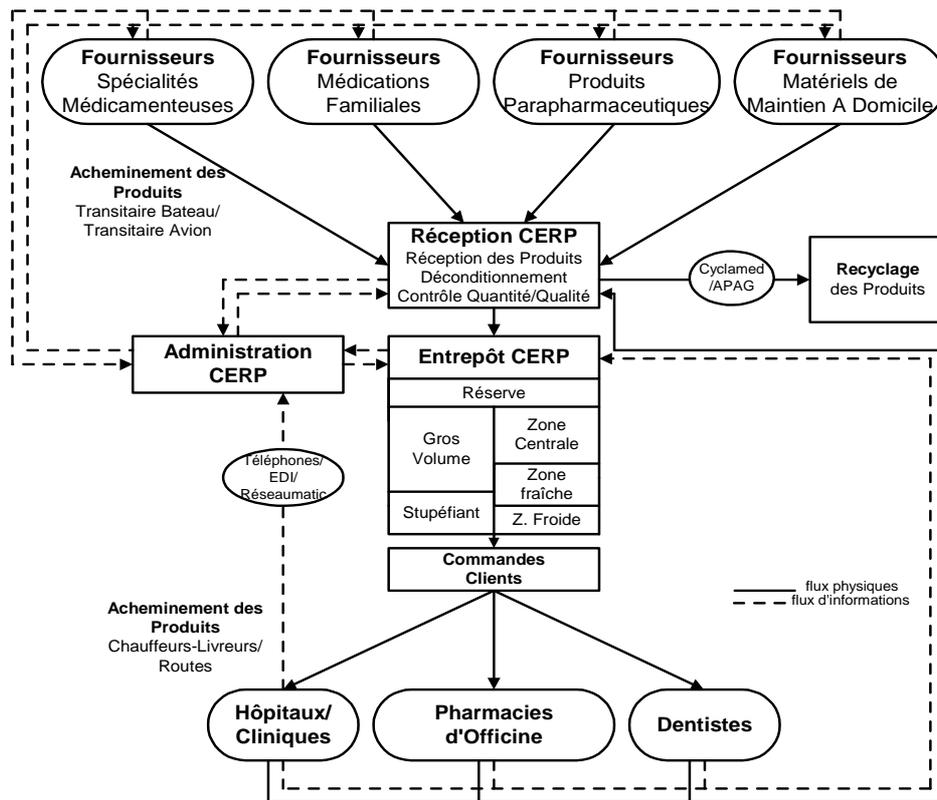
Le parc informatique de la CERP est assez récent et complet, avec une quinzaine de poste informatique, une dizaine d'imprimantes, un rétroprojecteur et un vidéo- projecteur. Dans le local technique de la CERP se trouve l'ordinateur central, ainsi qu'un serveur EDI et un serveur bureautique. La CERP utilise un ordinateur central AS 400 système IBM sur lequel sont installés un logiciel propriétaire de gestion commerciale et divers progiciels de comptabilité et de gestion. Le système EDI, Échange de Données Informatisé, qui permet l'échange de données directement d'ordinateurs à ordinateurs, augmente la rapidité de transmission des informations. Ce système participe également à l'objectif de réduction des coûts dans le cadre d'un SCM à la fois grâce à la baisse des coûts administratifs –coûts de traitement de l'information- et à celle des coûts d'émission –moins de papier. Cependant, rendre accessible l'EDI à un nombre élevé de partenaires nécessite l'utilisation d'un matériel informatique compatible et d'un langage commun. La CERP utilise un langage commun à partir du langage normalisé EDIFACT. La désignation des produits dans ce message utilise le code CIP, code numérique composé de six chiffres plus un chiffre clé de contrôle. Ce code CIP permet d'identifier un million de références, chaque série de codes étant dédiée à une catégorie de produits (300 000 à 399 999 : présentation de médicaments à usage humain). La CERP utilise des lecteurs optiques qui permettent d'identifier le produit par son code CIP, puis de trier et d'acheminer les produits vers les entrepôts. L'utilisation du code à barre et plus généralement le système informatique de la CERP favorisent la traçabilité des médicaments. Par ailleurs, la CERP dispose d'un site Internet régulièrement mis à jour qui lui permet d'informer la

population médicale et non médicale sur les nouveaux produits, les exclusivités de la CERP (revue "bien être et santé")...

2.2. La gestion de la chaîne logistique à la CERP

La chaîne logistique de la CERP est principalement composée des approvisionnements, de l'entreposage et du transport. Ces processus principaux ne peuvent être optimisés sans la maîtrise des processus de soutien comme les technologies de l'information et de la communication et les ressources humaines. Il s'agit ici de montrer comment concrètement se pratique une gestion intégrée des flux dans la société considérée.

Schéma 2. La chaîne logistique de la CERP



2.2.1. La gestion des Approvisionnements

La responsable des approvisionnements utilise des progiciels qui effectuent des propositions d'approvisionnements deux fois par mois, en s'appuyant sur l'historique des ventes mensuelles. Le système propose au responsable des approvisionnements pour chaque fournisseur et par références les quantités à commander en tenant compte des ventes des trois mois précédents. Pour chaque produit, le système calcule la consommation journalière moyenne, puis détermine le niveau du stock optimal. Il compare ensuite le niveau du stock optimal avec le stock du produit sur place et la quantité du produit en cours de livraison. Le système déduit alors la quantité du produit qu'il faut commander pour atteindre le niveau de stock souhaité. La responsable des approvisionnements arrondit la quantité proposée au "gabarit". Par exemple, si le système propose une commande de 28 produits, alors que les produits sont conditionnés et livrés par lot de 15, alors la CERP optera pour une commande de 2 lots, soit 30 produits. Les produits spéciaux – stupéfiants- qui représentent environ une centaine de produits tenus en permanence par la CERP font l'objet d'une procédure d'approvisionnement spéciale.

Les produits à forte et moyenne rotation (environ 8000 produits) sont commandés directement près des laboratoires de spécialités médicamenteuses, de médicaments familiales, de produits parapharmaceutiques et de matériels de maintien à domicile. Après validation de la commande, le système informatique de la CERP envoie les commandes aux fournisseurs par l'intermédiaire d'EDIPHARM, entreprise prestataire de service et spécialiste de l'EDI des produits pharmaceutiques. Le système informatique de la CERP se connecte ainsi à la fin de chaque journée chez EDIPHARM qui reçoit deux types de fichiers destinés à l'envoi l'un par EDI et l'autre par fax. Lorsqu'un fournisseur ne dispose pas du système EDI, la commande lui est envoyée automatiquement par fax. Cependant, ce système n'est pas encore optimisé dans la mesure où la CERP n'obtient pas d'informations immédiates sur l'état de sa commande et n'a d'autres choix que d'attendre l'arrivée de sa facture. Au mieux, elle reçoit cette facture par courrier dans les 8 jours suivants la passation de la commande. Ce manque d'informations s'explique sans doute par le fait que la CERP ne contribue que de façon infinitésimale au chiffre d'affaires de ses fournisseurs, la distribution pharmaceutique martiniquaise ne représentant que 0,42% du

marché global français. Afin d'améliorer la gestion des approvisionnements, la CERP envisage de se doter d'un système permettant au fournisseur de renvoyer la facture beaucoup plus rapidement.

Pour les produits à faible rotation dont les ventes n'excèdent pas 20 unités par mois, la taille des lots ne permet pas à la CERP de s'adresser directement aux laboratoires. Elle va donc s'adresser elle-même à un grossiste-répartiteur situé en France métropolitaine, la CERP Rouen. La commande s'effectue de façon automatique. Ainsi, tous les soirs, le système EDI de la CERP Martinique se connecte au serveur de la CERP Rouen pour lui envoyer une commande. La réception de la réponse se fait en temps réel, ce qui permet à la CERP Martinique d'être immédiatement informée de l'absence éventuelle d'un produit mentionné sur la commande. La CERP Rouen regroupe les commandes, les traite, puis les achemine par avion en moyenne deux fois par semaine.

2.2.2. L'acheminement des marchandises vers la CERP

La CERP s'adresse principalement à deux transitaires au départ de la France métropolitaine, SIFA pour le transport aérien et GONDRAND pour le transport maritime. Pour réduire les coûts de transport de la marchandise, les transitaires regroupent les commandes. Les marchandises mettent généralement de 12 à 13 jours au départ du Havre pour arriver à destination contre une journée par transport aérien. Cependant, de nombreux aléas peuvent retarder le départ du produit. Par exemple, le médicament n'étant pas considéré comme une marchandise prioritaire, il peut arriver qu'une partie du chargement soit débarquée à l'aéroport d'Orly. Cela oblige la CERP à détenir un stock surabondant par rapport aux normes métropolitaines. Compte tenu du coût du transport aérien, deux tiers des produits sont acheminés par bateau sur des navires porte-conteneurs et l'autre tiers par avion. Le choix entre un mode de transport ou l'autre va dépendre du volume, du poids et du prix de vente de la marchandise. Ainsi, pour les produits volumineux, l'acheminement par bateau sera privilégié alors que les produits frais comme les vaccins seront acheminés par avion. D'autres paramètres logistiques seront à prendre en considération comme les délais de péremption du produit ou les délais de livraison. Le choix du mode de transport est encore plus complexe pour les produits faisant l'objet d'une commande spéciale. Comme la loi impose un prix de vente, la CERP ne peut faire payer à son client un coût supplémentaire de transport pour ces produits et doit donc

assumer elle-même ce coût sachant que le transport par avion augmente la valeur brute de la marchandise de 17% en moyenne contre 13% par bateau. La CERP a inclus le choix du mode de transport le plus optimal dans la procédure d'approvisionnement du produit. Le système informatique de la CERP va ainsi proposer pour chaque produit un mode de transport compte tenu de son coût de revient. A leur arrivée à la Martinique, les produits seront ensuite gérés par une seule société, Transit Martiniquais.

2.2.3. La réception des produits et la gestion de l'entrepôt et des stocks

Les produits, une fois acheminés et réceptionnés par la CERP, sont systématiquement contrôlés afin de vérifier la conformité de la livraison en quantité et en qualité. En cas de défaut de qualité d'un ou de plusieurs produits, des données relatives à ces produits seront enregistrées dans le système comme le jour de l'arrivée du produit et la défaillance constatée. De même, l'absence d'un produit ou une livraison en quantité insuffisante sera immédiatement signalée. La valorisation de la marchandise ne s'effectue pas par la méthode des Coûts Unitaires Moyens Pondérés (CUMP) mais directement sur la base de son prix de revient. L'utilisation du lecteur optique permettra d'enregistrer tous les produits remplissant les exigences de qualité de la CERP sur le réseau informatique de la CERP en précisant leur date d'arrivée, leur date de péremption et le numéro du lot auxquels ils appartiennent. Le système attribue alors à chaque produit un code géographique afin de faciliter son rangement dans l'entrepôt. L'entrepôt est divisé en différentes zones adaptées à la nature du produit : une zone centrale à température ambiante, une zone fraîche à 15°C, une zone froide à 5°C, une zone pour ranger les produits volumineux et une zone sécurisée où sont rangés les stupéfiants. La CERP a également une réserve où sont rangés les produits qui ne peuvent être mis en rayon par manque de place. Cette réserve est également divisée en zones.

Compte tenu de la distance qui sépare la CERP de ses fournisseurs et de l'obligation légale d'assurer la livraison immédiate de tous les médicaments, la CERP est obligée de maintenir un stock sur place élevé. Il faut compter également avec les aléas concernant la chaîne du transport, et les incertitudes quant à la disponibilité des marchandises chez les fournisseurs. Ainsi, la CERP est-elle contrainte de maintenir environ 70 jours de stock contre 15 jours pour les distributeurs de médicaments en France Métropolitaine. La valeur des stocks calculée en prix de revient représente dès lors plus de 17% du chiffre d'affaires et la

valeur des stocks calculée au prix de vente pharmacien représente 22% environ. La gestion des stocks est effectuée directement par le système informatique qui déduit automatiquement la quantité de produits commandée par les clients du stock de produits disponibles. Par exemple, si une pharmacie d'officine commande deux unités, et le stock disponible à la CERP est de 10 unités, le système va indiquer après validation de la commande du client 8 unités, même si la commande de ce dernier n'a pas encore été préparée. La gestion des stocks s'effectue donc en temps réel, ce qui permet à un client d'être informé immédiatement de l'absence éventuelle d'un produit. Comme la majorité des produits traités par la CERP sont des marchandises périssables, la responsable des stocks s'appuie sur la méthode FIFO (First In First Out). Les produits seront normalement rangés de façon à faciliter la sortie des premiers produits entrés.

2.2.4. La passation des commandes des clients

Les pharmacies d'officine peuvent commander aussi bien les produits tenus régulièrement par la CERP que les autres références, qui font l'objet d'une procédure d'approvisionnement particulière. Ainsi, pour commander des produits qui ne sont pas gérés en continu, chaque pharmacie dispose de feuilles de commandes spéciales, qui sont remplies puis faxées à la CERP.

Concernant les produits pharmaceutiques régulièrement tenus par la CERP, les pharmacies d'officine ont la possibilité d'utiliser différentes voies pour passer leurs commandes en fonction des moyens dont elles disposent. La passation des commandes s'effectue à plus de 86% par échange de données informatisé. Les officines se sont munies pour cela de logiciels tels que CIP, WINPHARMA, logiciel Alliance qui leurs permettent de passer automatiquement leurs commandes. Le logiciel des pharmaciens effectue des propositions de commandes. Une fois la commande validée, le système déclenche la commande par modem et se connecte au système de la CERP. Après identification du fournisseur, la commande est transmise à la CERP. Le système de la CERP vérifie ensuite la disponibilité ou non du produit dans son entrepôt. La CERP informe alors immédiatement l'officine de l'absence d'un ou de plusieurs produits en précisant si la défaillance provient de la CERP elle-même, du laboratoire ou encore si le produit n'est plus fabriqué.

Les clients peuvent également utiliser un boîtier spécialement développé pour la pharmacie, le "réseumatic". Ce boîtier est un lecteur de fiches qui est connecté à une machine spéciale reliée à l'AS 400 et

comprenant quatre modems et quatre lignes de communication. L'utilisation du boîtier permet à quatre pharmaciens d'officine de passer simultanément des commandes en composant un numéro identique. Enfin, la pharmacie peut appeler directement la CERP lorsqu'elle ne dispose pas de système EDI ou pour certains produits qui n'ont pas de code CIP. Les pharmacies sont appelées systématiquement environ une heure avant le départ de chaque tournée pour prendre éventuellement connaissance de modifications ou de compléments de commandes.

2.2.5. La préparation des commandes des clients

Chaque fois qu'un client passe une commande, le système identifie la prochaine livraison programmée pour ce client, s'il y en a une, et la nouvelle commande est affectée automatiquement à la prochaine livraison du client. Dans cette hypothèse, la nouvelle commande vient donc s'ajouter à une commande précédemment passée, mais pas encore livrée. La commande reste bloquée dans le système et n'est imprimée que juste avant la tournée. L'objectif est d'optimiser la préparation de la commande en n'imprimant que les bons de commande à préparer immédiatement. Le déblocage et l'impression de la commande s'effectuent en fonction des heures de départ des tournées.

Chaque produit disposant d'un code géographique, la commande est imprimée dans l'ordre d'emplacement géographique pour optimiser la préparation. Au poste de lancement, une personne est chargée d'imprimer la commande et de la mettre dans un bac de couleur verte. Le convoyage du bac s'effectue par tapis roulant ce qui permet de préparer la commande plus rapidement. De plus, la commande est imprimée en fonction des zones et du type de produits. Une même commande peut faire l'objet de plusieurs factures et est généralement servie par plusieurs personnes. Dans une même zone (centrale), on peut retrouver plusieurs préparateurs de commandes, en fonction de l'espace de la zone. Ainsi, pour réduire le nombre de "pas" du personnel, dans la zone centrale, trois personnes sont en poste habituellement et se chargent de la commande des produits situés dans les rangées qui leurs sont affectées. Par exemple, pour une commande composée d'un magné B6 et d'une boîte d'aspirine, produits qui sont rangés tous deux dans la zone centrale, deux personnes différentes peuvent préparer cette commande. La première dépose l'aspirine dans le bac, puis dépose sur le tapis roulant le bac qui sera convoyé jusqu'au deuxième préparateur qui déposera à son tour le magné B6 dans le bac. Lorsqu'il s'agit d'un complément de commande ou d'une commande concernant un produit de la zone froide –vaccin- les préparateurs utilisent un bac de couleur rouge pour signaler l'urgence.

Malgré les multiples précautions, le système n'est pas totalement exempt d'erreurs. Certains produits peuvent être manquants ou périmés. Dans ce cas, la facture est annotée pour indiquer que le produit ne sera pas livré dans les quantités prévues (ou pas du tout). La personne affectée au poste de contrôle de fin de chaîne se charge alors de vérifier que le produit n'est effectivement pas dans le bac et réimprime une nouvelle facture correspondant au contenu du bac. Ainsi, sauf erreur matérielle, dans chaque bac se trouve toujours la facture correspondant à son contenu réel. La personne affectée au poste de contrôle de fin de chaîne effectue en outre des contrôles systématiques pour certains clients, ceux qui sont très exigeants, ceux qui font des réclamations suspectes ou encore pour des clients très privilégiés envers lesquels la CERP tient à garantir en toute circonstance le "zéro défaut". C'est encore la personne au poste de contrôle qui lancera l'édition de la feuille de route pour les chauffeurs.

2.2.6. La distribution des produits aux pharmacies d'officine

La CERP organise en moyenne quatre tournées par jour. La première s'effectue entre 6h30 et 7h30, en fonction du lieu de livraison et de l'encombrement du réseau routier. Les autres tournées débutent à 11 heures, 14 heures et 17 heures. Le système informatique calcule la tournée optimale en fonction de la zone et de l'horaire de livraison. Chaque tournée est ainsi programmée et un client peut être concerné chaque jour par une ou plusieurs tournées. La CERP peut ainsi se comporter comme un "short-liner", vis à vis de certains clients secondaires (et dans ce cas ne leur livre qu'une seule fois par jour) ou comme un "full-liner", vis à vis des clients privilégiés. Face à l'étroitesse du marché, les grossistes-répartiteurs ne peuvent pas opter pour un seul mode de livraison. Les deux activités seront ainsi pratiquées en fonction du positionnement géographique de la pharmacie et de son positionnement dans les résultats de la CERP. Chaque pharmacie d'officine est préalablement informée des heures de livraison de la tournée la concernant.

Les chauffeurs-livreurs, employés de la CERP, se chargent du transport des produits vers les pharmacies d'officine. Ils contrôlent avant leur départ si tous les bacs inscrits sur leurs feuilles de routes sont présents. Ils récupèrent les gros volumes et les produits réfrigérés ou les produits spéciaux comme les stupéfiants, qui pour des raisons d'espace ou des raisons d'hygiène et de sécurité ne sont pas mis en attente de livraison dans la zone de chargement. Par ailleurs, à chaque livraison, les chauffeurs récupèrent les bacs vides de la précédente tournée ainsi que les retours et les réclamations des clients.

2.2.7. La "reverse logistic" ou gestion des retours à la CERP

Les retours peuvent être motivés par un défaut de qualité (produit défectueux ou périmé), une erreur lors de la prise de commande ou de la préparation de la commande, un changement d'avis du client. Les chauffeurs retourneront ces marchandises aux locaux de la CERP où ils seront, en fonction de la nature du refus, rangés dans l'entrepôt ou recyclés. Les chauffeurs pourront également ramener les médicaments qui ne sont plus commercialisés ou qui ne sont plus commercialisables dans les pharmacies d'officine ainsi que les médicaments usités et inusités qui s'entassent dans les armoires à pharmacies familiales et remis par les usagers aux pharmacies d'officine. A ces médicaments viennent s'ajouter ceux qui proviennent des laboratoires et qui, non-conformes, ne peuvent être distribués par la CERP. Tous ces médicaments seront rangés en fonction de leur nature consommable ou inutilisable dans des boîtes en carton. L'Association des Pharmaciens des Antilles et de la Guyane (APAG) récupère les boîtes contenant les médicaments consommables et se charge de les acheminer à des fins humanitaires vers des pays sous-développés comme Haïti ou Cuba. Les boîtes contenant les médicaments inutilisables, sont quant à elles stockées dans un container, puis acheminées vers la France métropolitaine pour que leurs contenus soient détruits dans un incinérateur conforme à la réglementation (inexistant à la Martinique). C'est la société Cyclamed qui valorise à des fins énergétiques les déchets issus des médicaments incinérés qui prendra en charge le container à son arrivée à la métropole et assurera la destruction des médicaments périmés.

2.3. La gestion de la chaîne logistique globale du médicament

2.3.1. La CERP et ses fournisseurs

La CERP et ses fournisseurs peuvent être amenés à collaborer lors du lancement d'un nouveau produit (référencement). Pour favoriser le lancement, les laboratoires envoient des délégués médicaux pour démarcher les médecins ainsi que les grossistes, qui pourront conclure un accord de reprise sur les produits invendus.

Par ailleurs, chaque laboratoire en se connectant sur le site de la CERP pourra acheter des informations relatives au positionnement de ses produits, comme le nombre de ventes, leurs évolutions, le niveau de stocks pour chacun des produits. Ces données permettront aux laboratoires de connaître précisément la position de ses produits sur le marché et d'établir des prévisions sur l'évolution de son activité.

2.3.2. La CERP et ses clients

La CERP propose différents services marchands aux officines. Elle peut calculer pour une officine sa marge, par catégorie et famille de produits. Elle peut également proposer un prix de vente pour le produit compte tenu de son coût de revient. Dans ce cas, le prix de vente suggéré est indiqué sur la facture du client. La CERP peut, pour le même montant, fournir avec le prix de vente des étiquettes indiquant le prix proposé pour le nombre d'articles concernés. Dans ce cas, l'officine n'a plus qu'à apposer les étiquettes sur les produits, ce qui lui permet d'effectuer plus rapidement l'entreposage.

La CERP peut également calculer la vitesse de rotation de chaque produit, et le nombre de commandes passé pour ce produit sur une période donnée. La CERP indique alors à ses clients les améliorations qu'ils peuvent apporter à leur gestion. Ainsi, au lieu de commander plusieurs fois de très petits lots, il peut être intéressant aussi bien pour la CERP que pour la pharmacie cliente de regrouper sa commande pour l'article considéré. La CERP loue en outre des appareils de transmission de commande pour les officines. Elle offre également des prestations de livraison et d'installations des matériels au domicile du patient ainsi que des sessions de formation des pharmaciens sur tous les aspects médico-techniques logistiques et administratifs. Enfin, le site Internet de la CERP permet aux officines, après qu'elles se soient dûment identifiées, de disposer de certaines informations sur l'état des stocks de la CERP, de connaître les offres et les demandes d'emploi dans le secteur pharmaceutique... Il faut noter que le processus d'intégration entre la CERP et ses clients est pour l'instant à sens unique. Les officines ne souhaitent pas en effet que les grossistes puissent disposer d'informations qui leurs permettraient de connaître leur attitude vis-à-vis de la concurrence, ce qui pourrait nuire aux relations qu'elles ont établies avec chaque répartiteur.

3. Conclusion

Face aux contraintes spécifiques de l'activité de distribution de produits pharmaceutiques, les grossistes-répartiteurs n'ont d'autres choix que d'optimiser leurs chaînes logistiques pour maintenir leurs parts de marché. Cette communication nous a permis de présenter concrètement la démarche du Supply Chain Management dans une activité de service. Notre étude confirme que l'adoption du SCM a permis à un grossiste-répartiteur implanté à la Martinique, la CERP, de gérer au mieux l'ensemble de sa chaîne et de maintenir ainsi une évolution progressive de ses parts de marché au cours de ces douze années d'activité. Cependant, l'étude fait apparaître également que le processus d'optimisation est soumis à davantage de contraintes dans les Départements Français d'Amérique que dans les autres départements de la France métropolitaine. Aux contraintes inhérentes à la distribution de médicaments, viennent s'ajouter dans ces départements d'autres spécificités qui peuvent soit entraver l'application stricte de la réglementation, soit accroître la pression exercée sur la chaîne de distribution de la CERP. Il en résulte des différences importantes dans le fonctionnement des répartiteurs ici et en Métropole. Ainsi, alors que les grossistes-répartiteurs sont légalement contraints de détenir en permanence au moins 90% de leurs références, seules 10% sont détenues et gérées quotidiennement par la CERP. Cette situation est principalement liée, comme on l'a vu, au caractère « ultrapériphérique » des DFA. C'est pour cette raison que la CERP se trouve dans l'obligation d'accepter un taux de rotation des stocks bien plus lent qu'en Métropole. De plus, les médicaments ne sont pas de simples produits de consommation courante. Ce sont surtout des produits destinés à améliorer la santé. L'entreposage et le stockage doivent obligatoirement garantir le maintien des qualités thérapeutiques du médicament ; ils s'intègrent donc dans un processus de gestion très rigide et très complexe. On comprend dès lors pourquoi la CERP ne maintient qu'un nombre relativement limité de références. Par ailleurs, les conflits sociaux sont le lot de bon nombre d'entreprises implanté dans les D.F.A. Pour éviter tout risque de conflit, qui serait lourd de conséquence pour la CERP aussi bien que pour la santé publique s'il devait durer, le directeur de la CERP n'a d'autre choix que d'être perpétuellement à l'écoute de son personnel et réactif face à ses demandes.

Bibliographie:

Aurifeille J-M., Colin J., Fabbe-Costes N., Jaffeux C., Paché G., 1997, *Management Logistique, une approche transversale*, Coll. "Les Essentiels de la Gestion", Litec, Paris, 187 p.

Ballou R.H. 1992, *Business Logistics Management*, Prentice-Hall International Editions, Third Edition, 688 p.

Colin, J., Fabbe-Costes, N., Paché, G., 2000, *Faire de la recherche en logistique et distribution*, Coll. "Fondation Nationale pour l'Enseignement de la Gestion des Entreprises", Vuibert entreprises, Paris, 292 p.

Cooper M., Lambert D., Pagh J., 1997, "Supply Chain Management : More Than a New Name for Logistics", *International Journal of Logistics Management*, Vol 8 n°1, pp. 1-14.

Duane Ireland R., Hitt M., Vaidyanath D., 2002, "Alliance Management as a source of Competitive Advantage", *Journal of Management*, Vol. 28, n°3, pp. 413-446.

Fabbe-Costes N., 1997, "Pilotage logistique : quel système d'information et de communication?", Chap. 4, in Aurifeille *et al.*, (1997), pp. 111-144.

Le Guisquet O., Lorenzi J., 2001, *La Distribution pharmaceutique en France*, Coll. "Actu Pharma", Ed. Elsevier, Paris, 78 p.



Thrycia TITE, certifiée en économie et gestion, exerce en tant que PRCE au département Gestion Logistique et Transport de l'IUT d'Evry-Val d'Essonne

Commande d'un actionneur électrique par communication sans fil Zigbee

Jean-François Llibre, Beñat Arruti Gesalaga, Yoan Clouet

IUT Toulouse II Blagnac
LATTIS
1 Place Georges Brassens - BP 60073 - 31703 Blagnac Cedex
llibre@iut-blagnac.fr

Section de rattachement : 63

Secteur : Secondaire

RÉSUMÉ : *Nous présentons ici un asservissement de position en sans fil d'un moteur à courant continu. La consigne élaborée au niveau d'un PC distant est envoyée via un module Zigbee à un autre module Zigbee, qui lui relié au moteur à commander, renvoie la mesure de la position. La commande numérique mise en œuvre doit être suffisamment robuste et la période d'échantillonnage judicieusement choisie pour s'affranchir des contraintes imposées par la communication hertzienne. Nous utilisons dans la commande, un prédicteur estimateur à base de filtre de Kalman. Ce dernier substitue, au retour de l'information réelle éventuellement perdue ou retardée (en l'occurrence ici la position du moteur), une information anticipée adéquate. Nous assurons ainsi par ce biais la stabilité de l'asservissement numérique en boucle fermé de ce moteur piloté par des modules Zigbee.*

MOTS-CLÉS : *actionneur électrique, asservissement, filtre de Kalman, communication sans fil, technologie zigbee.*

Introduction

Habituellement, la régulation en vitesse ou en position d'un actionneur électrique s'effectue via des liaisons filaires. Si pour des contraintes d'exploitation, les consignes et les informations de mouvement ne

peuvent transiter par des fils, alors on peut envisager des communications hertziennes entre l'organe de commande (par exemple un micro-ordinateur PC) et le système à commander (par exemple un moteur à courant continu). Ainsi, pour des applications nécessitant du suivi de trajectoires, ce mode de commande peut être utilisé. Cependant, les communications hertziennes peuvent induire des retards variables et des pertes d'informations dans la transmission, dus à l'environnement ou aux interférences extérieures. Ces contraintes ont une influence directe sur la stabilité du système (Tipsuwan et al. 2003).

L'objet de l'étude est un asservissement en position d'un moteur à courant continu où la transmission radio entre le PC et l'alimentation de l'actionneur s'effectue via des modules Zigbee, basés sur la norme IEEE 802.15.4. Après avoir présenté le système à commander et les modules Zigbee utilisés, nous identifierons le système afin d'en déduire un modèle. A partir de ce dernier, nous pourrons élaborer le prédicteur estimateur à base de filtre de Kalman à implanter dans le PC qui permettra d'élaborer une estimation de la sortie position du moteur en cas de perte d'information. Pour finir, nous présenterons les résultats de simulations et les mesures expérimentales qui valident ce principe de commande.

1. Présentation du système

1.1. L'actionneur à commander

L'actionneur que nous allons asservir en position est le moteur à courant continu à aimants permanents de la maquette pédagogique MV-451 de chez Alecop. Ce moteur entraîne via un réducteur de rapport 30, deux roues codeuses et une dynamo tachymétrique. Associé au réducteur, un capteur potentiométrique analogique donne l'indication de position angulaire. Pour commander et alimenter le moteur, la maquette Alecop dispose de modules correcteurs analogiques proportionnel et/ou intégral et un module d'alimentation (hacheur MLI) appelé « driver ».

1.2. Les modules communicants Zigbee

La technologie Zigbee utilisée ici s'appuie sur la norme IEEE 802.15.4 pour les couches physiques et liaisons. Cette technologie est idéale pour la communication entre des capteurs et des actionneurs dans des systèmes embarqués et est caractérisée par une portée de quelques dizaines de mètres, un débit faible (max. 250 kbit/s) et une faible consommation énergétique (Van den Bossche et al. 2010).

Nous utiliserons dans notre application, la topologie peer to peer et le mode non coordonné. Ainsi, un module Zigbee est relié à un micro ordinateur de type portable via une liaison série USB (cf. figure 1). La consigne de position angulaire est envoyée au second module Zigbee distant, qui lui est relié au moteur à courant continu (MCC) à asservir en position via le driver. L'information de position angulaire réelle est alors transmise par le module Zigbee distant au premier module relié au PC assurant ainsi la boucle d'asservissement.

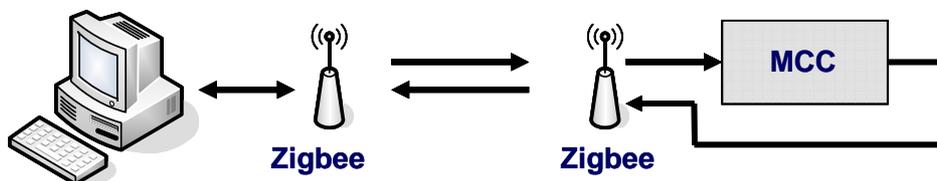


Figure 1 . Schéma de principe de l'asservissement en sans fil avec les modules Zigbee

Les modules Zigbee utilisés sont des modules 13213-SRB de Freescale, certifiés IEEE 802.15.4 et travaillant à 2,4 GHz. Ils sont alimentés par deux piles de 1,5V type LR6 ce qui les rend intéressants pour des applications embarquées.

2. Identification du système, établissement du modèle

2.1. Caractéristiques du système à commander

Le système à commander comprend le hacheur (driver), le moteur, le capteur de position angulaire et le correcteur analogique. Le driver peut être modélisé par la fonction de transfert : $K_H \cdot e^{-\tau \cdot p}$. Pour simplifier la mise en équation d'état on négligera le retard τ . Le correcteur analogique utilisé pour l'asservissement de position sera le correcteur proportionnel de gain K_C . Il est à noter que la maquette est alimentée en ± 15 V et que les correcteurs analogiques saturent à partir de ± 7 V. Le capteur de vitesse est une dynamo tachymétrique de coefficient 7 mV/tr.mn^{-1} . Le capteur de position angulaire (capteur potentiométrique) donne une tension proportionnelle à la position angulaire : 10 V pour 360° . Le moteur à courant continu à aimants permanent a les caractéristiques suivantes : tension d'alimentation maximale ± 10 V, courant nominal 0,6 A et vitesse nominale 1200 tr.mn^{-1} .

2.2. Asservissement de position en boucle fermée en filaire

Suite à un essai en boucle ouverte, on a pu modéliser l'ensemble moteur et capteur par une fonction de transfert du 1^{er} ordre avec le gain $K_m = 0,94$ et la constante de temps $T_m = 116 \text{ ms}$ pour le moteur et le gain $K = 0,83$ pour le capteur analogique. La figure 2 représente le schéma bloc de l'asservissement en position en boucle fermée (BF) avec le correcteur proportionnel K_C et l'accumulateur H de la maquette. Le segment de droite en pointillé indique la zone où on « coupe les fils » pour faire la commande en sans fil par l'intermédiaire des modules Zigbee (cf. §4.1). S_Ω est la sortie tension de la dynamo tachymétrique image de la vitesse et S_θ la sortie tension du capteur analogique.

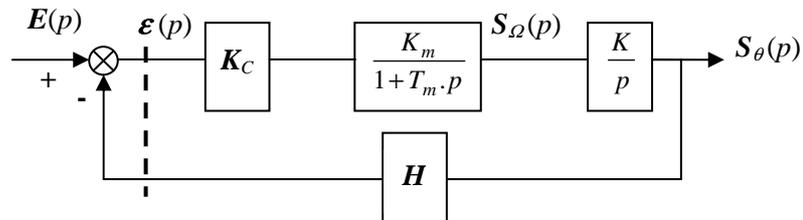


Figure 2 . Schéma bloc de la BF en position

La figure 3 représente la réponse en position à un échelon de consigne pour un correcteur réglé de manière à assurer un compromis vitesse de la réponse et stabilité. Pour ce faire on a réglé K_C à 10 et H à 1.

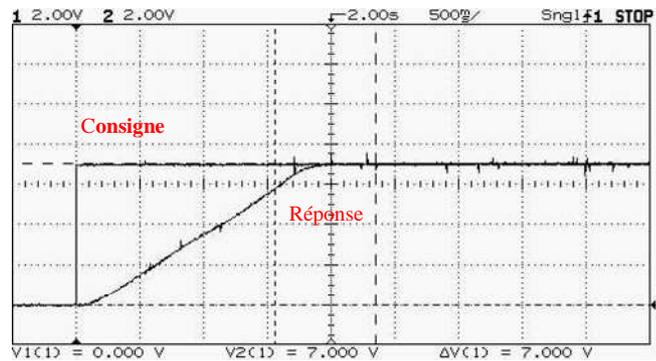


Figure 3 . Réponse à une consigne échelon de 250° (7 V)

Bien que la réponse n'ait pas l'allure de celle d'un système du 1^{er} ordre, on peut estimer la constante de temps à environ 1,2 s. Cette dernière, suffisamment lente, nous laisse supposer que l'asservissement en sans fil du système est réalisable.

2.3. Passage aux équations d'état

A partir du schéma bloc de la figure 2, on en déduit les équations d'état dans l'espace discret [1] qui régissent les évolutions du système. On choisit comme variable d'état $X = (S_\theta, S_\Omega)^T$ qui correspond aux variables physiques « position » et « vitesse ».

$$X_{k+1} = A.X_k + B.E_k = \begin{pmatrix} 1 & KT_e \\ -HK_C K_m T_e & 1 - \frac{T_e}{T_m} \end{pmatrix} X_k + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{K_C K_m T_e}{T_m} \end{pmatrix} E_k \quad [1]$$

$$Y_k = C.X_k = (1 \ 0)X_k$$

3. Principe de la commande en sans fil

3.1. Principe de l'estimateur-prédicteur

Afin d'assurer la robustesse de l'asservissement en sans fil, nous mettons en place un estimateur prédictif à base d'un filtre de Kalman. Ce dernier permettra de s'affranchir des éventuels retards ou pertes d'informations. Nous utiliserons le correcteur analogique du système afin de comparer les deux commandes avec et sans fil. La figure 4 montre le principe de commande en sans fil mis en place.

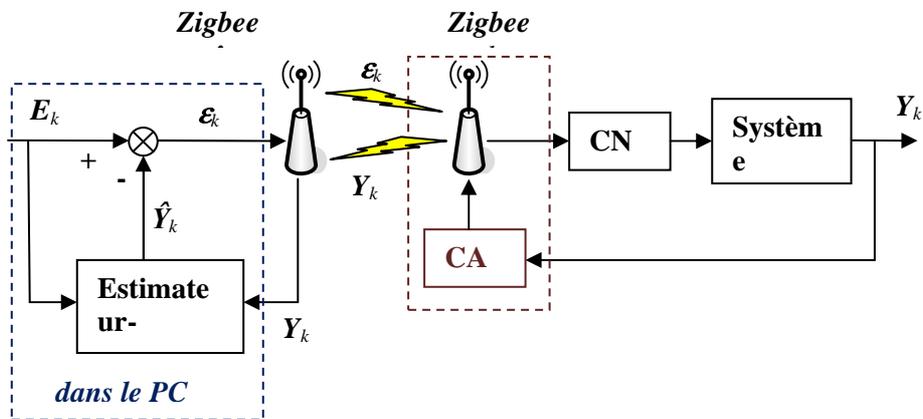


Figure 4 . Schéma bloc du système à commander en sans fil

Le module Zigbee côté PC est appelé Zigbee maître. Il envoie la consigne, en fait le signal d'erreur ε_k et reçoit le signal de sortie du système Y_k qui est la sortie position $S_{\theta k}$ issue du capteur potentiométrique. Le module Zigbee côté système est lui appelé Zigbee esclave. Pour ce dernier, on utilise le CAN incorporé pour numériser l'information de position. L'erreur ε_k reçue est égale à la consigne E_k moins l'estimation \hat{Y}_k de la sortie position. Le système correspond à l'ensemble : correcteur, driver, moteur à courant continu et capteur potentiométrique ; soit tous les blocs de la figure 2.

Le programme à implanter dans le PC, doit effectuer l'estimation de la sortie position \hat{Y}_k dans le cas où la mesure Y_k est soit perdue, soit entachée d'une erreur, soit n'est pas reçue à l'instant « k ». Pour ce faire, on utilisera le filtre de Kalman où la mise en œuvre se fait en deux étapes (Alazard 2005).

La première étape est une étape de prédiction. A l'instant k , on connaît l'état et on prédit l'état à l'instant $k + 1$ en utilisant le modèle donné en [1] :

$$\hat{X}(k+1/k) = A.\hat{X}(k/k) + B.E(k) \quad [2]$$

On calcule le signal d'erreur ε_{k+1} à envoyer :

$$\varepsilon(k+1) = E(k+1) - \hat{Y}(k+1) = E(k+1) - C.\hat{X}(k+1/k) \quad [3]$$

La deuxième étape est une étape de recalage. A l'instant $k + 1$, on recalcule la prédiction avec l'innovation (mise à jour de l'estimée par la nouvelle mesure) via le gain du filtre K_f que l'on a déterminé avec le logiciel Matlab (cf. § 4.2) :

$$\hat{X}(k+1/k+1) = \hat{X}(k+1/k) + K_f [Y(k+1) - C \cdot \hat{X}(k+1/k)] \quad [4]$$

Pour donner plus de confiance au modèle ou aux mesures, il est nécessaire d'estimer les covariances des bruits Q et R qui seront fixées par simulation (cf. § 4.2).

3.2. Simulation de l'asservissement de position en sans fil

La période d'échantillonnage est un paramètre important à fixer pour les simulations et pour la commande réelle du système. On doit la choisir au moins dix fois plus petite que celle du système asservi en boucle fermée, soit inférieure à 120 ms.

Pour simuler cette commande, on a utilisé le logiciel Matlab. Le bloc système de la figure 4 est simulé par les matrices d'état A' , B' , C' données en [5]².

$$X_{k+1} = A' \cdot X_k + B' \cdot \varepsilon_k = \begin{pmatrix} 1 & K \cdot T_e \\ 0 & 1 - \frac{T_e}{T_m} \end{pmatrix} X_k + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{K_C K_m K T_e}{T_m} \end{pmatrix} \varepsilon_k \quad [5]$$

$$Y_k = C' \cdot X_k = (1 \quad 0) X_k$$

Après plusieurs simulations (en tenant compte de la saturation du correcteur), la période d'échantillonnage optimale a été obtenue pour $T_e = 30$ ms. Au niveau du filtre de Kalman, on a donné plus d'importance au modèle mathématique issu de l'identification du système qu'aux mesures. Pour ce faire, on a ajusté les covariances des erreurs telles que Q et R soient faibles. La figure 5, présente la sortie position simulée du système (étoiles) ainsi que la sortie estimée par le filtre (ronds). La robustesse de la commande est testée par des pertes d'informations fixées

² Ces matrices correspondent aux blocs de K_C à H de la figure 2 entre les pointillés.

toutes les 10 périodes d'échantillonnage. On peut constater que le filtre de Kalman corrige correctement et permet d'assurer l'asservissement.

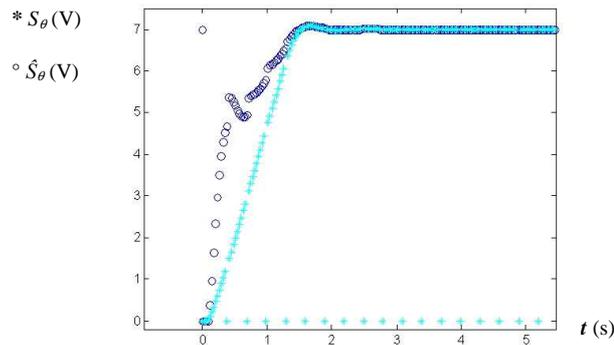


Figure 5. Simulation du système avec $T_e = 30 \text{ ms}$, $Q=2$ et $R=1$ et perte d'informations toutes les $10T_e$ pour une consigne de 7V soit 250°

3.3. Considération sur la période d'échantillonnage

Le port série du PC qui est relié au module maître est configuré à 57600 bauds ($278 \mu\text{s}$ pour les 2 octets à envoyer), vitesse maximale compatible entre le PC et le module. Les modules Zigbee communiquent entre eux à 250kbit/s (soit $96 \mu\text{s}$ pour les 3 octets à envoyer : deux octets de données et un octet d'en tête). Le module Zigbee maître attend pendant 1 ms un accusé de réception (ACK). S'il ne le reçoit pas, il peut réémettre de la même manière 4 fois (5 émissions consécutives programmées). Au maximum, le temps de transmission du PC vers le système est donc d'environ 5 ms. La consigne reçue par radio est convertie par un CNA (AD545 d'Analog Device, temps de conversion de 200 ns), puis est prise en compte par le système (correcteur analogique, driver, moteur et capteur potentiométrique), puis est convertie par le CAN incorporé au module Zigbee esclave (temps de conversion de $15 \mu\text{s}$). La sortie position du système numérisée est alors envoyée du module esclave vers le module maître. Le temps de retour est donc aussi d'environ 5 ms (5 émissions possibles si pas d'ACK reçue) à majorer de 1 à 2 ms (temps au niveau du système). Nous obtenons donc une boucle de transmission des informations de maximum 12 ms que l'on peut

majorer de 10 ms si on tient compte des temps de calcul du PC et des accès au port série de celui-ci. La période d'échantillonnage doit donc être comprise entre 22 ms et 120 ms, et le choix effectué dans la simulation de 30 ms sera donc expérimenté (cf. §4.2).

4. Expérimentation de la commande en sans fil

Nous avons effectué un programme en C à l'aide de Dev-C++ qui gère le port USB du PC pour la communication avec le module Zigbee maître. Il traite aussi les informations pour calculer la commande à envoyer par l'utilisation du filtre de Kalman décrit précédemment. La figure 6 présente un essai pour une consigne de 5 V correspondant à 175° avec les signaux affichés issus du module Zigbee maître (pour le retour de S_θ mesuré).

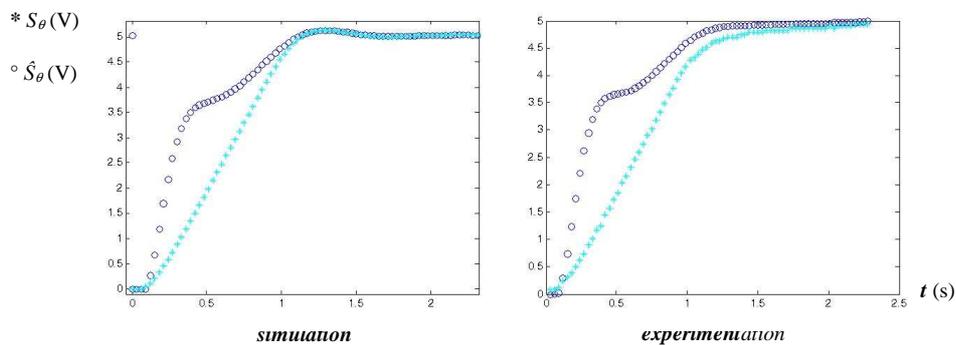


Figure 6. Sorties estimées (ronds) et réelles (étoiles) en simulation et expérimentation pour une consigne de 5 V soit 175°

La figure 7 montre un autre essai pour une consigne de 4,5 V soit 160° avec les signaux pris au niveau du système par l'intermédiaire d'un oscilloscope.

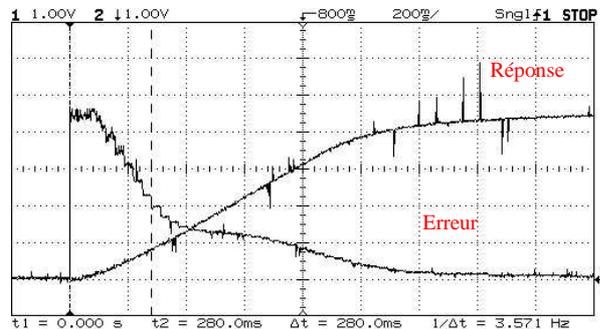


Figure 7. Signal d'erreur et sortie position réelle pour une consigne de 4,5 V soit 160°

Les frottements de la maquette non pris en compte dans la modélisation, conduit au niveau des courbes expérimentales à ce que la valeur finale de la position est atteinte sans dépassement. Au vu des figures 8 et 9, on peut constater que l'asservissement en position du moteur via des modules Zigbee par l'utilisation d'un filtre de Kalman fonctionne correctement. On peut ainsi les comparer à l'asservissement filaire de la figure 3.

5. Conclusion

L'asservissement en sans fil, via des modules Zigbee, mis en œuvre a permis grâce à l'emploi d'un prédictor-estimateur à base d'un filtre de Kalman d'en assurer la stabilité. Nous avons ainsi mis en évidence la robustesse de l'asservissement en position d'un moteur à courant continu. La constante de temps du système était assez lente (environ 120 ms) et la période d'échantillonnage choisie était de 30 ms. On peut envisager sur le même principe, l'asservissement en vitesse du moteur. Pour ce faire, il faudrait diminuer la période d'échantillonnage à la valeur minimale trouvée, soit environ 10 ms, et par le même temps augmenter la vitesse de la communication série entre le PC et le module Zigbee et limiter le nombre de retransmissions entre les modules en cas de perte d'informations.

Une autre étape, consisterait à s'affranchir du correcteur analogique de la maquette. Nous avons expérimentés une commande avec un correcteur entièrement numérique qui a donné satisfaction. Au

niveau simulation, nous avons également testé une commande par placement de pôles avec un observateur et un estimateur ainsi qu'une commande LQG associé à un filtre de Kalman qui cependant semblaient moins intéressantes au niveau rapidité que celles présentées ici.

Bibliographie

Alazard D., Introduction au filtre de Kalman, notes de cours Supaero, janvier 2005.

Tipsuwan Y., Chow M-Y., « *Control methodologies in networked control systems* », Control Engineering Practice, vol. 11, Elsevier, 2003, p. 1099-1111

Van den Bossche A., Val T., Campo E., « *Un système de communication radio adapté à la robotique mobile coopérante basé sur IEEE 802.15.4 / ZigBee* », JESA : Journal Européen des Systèmes Automatisés, vol. 1-2010, Lavoisier, janvier 2010



Jean-François Libre a obtenu un doctorat en génie électrique de l'Institut National Polytechnique de Toulouse en 1997. Ce travail de recherche effectué au Laboratoire d'Electrotechnique de Montpellier portait sur l'étude d'une nouvelle structure d'actionneur électrique. En 1998, il est nommé maître de conférences à l'IUT de Cherbourg Manche où il travaille sur la caractérisation de transistors à effet de champ réalisés en couche mince (TFTs).

En 2003, il effectue une mutation à l'IUT Toulouse II de Blagnac. Rattaché au Laboratoire LATTIS, il travaille sur les systèmes communicants sans fil appliqués à la domotique, leur autonomie énergétique et le contrôle commande en sans fil d'actionneur électrique. Depuis 2011, ses activités de recherche relèvent de l'électrodynamique appliquée au médical au sein de l'équipe GREM3 du laboratoire LAPLACE de l'Université de Toulouse.

Le travail présenté a été effectué au Lattis suite à l'encadrement de deux étudiants, Beñat Arruti Gesalaga, et Yoan Clouet, en Master Recherche SAID de l'Université Toulouse III.

Générateur sinusoïdal biphasé contrôlé numériquement.

Jean Bayard ^{*}, Anne Marie Bayard ^{}**

^{*} GREYC (CNRS UMR6072) ENSICAEN (IUT Alençon)

^{**} IUT ROUEN département GEII

jean.bayard@unicaen.fr, AnneMarie.Bayard@univ-rouen.fr

Sections de rattachement : 63.

Secteur : Secondaire

RÉSUMÉ. *Ce papier décrit un générateur sinusoïdal biphasé contrôlé numériquement. Ce générateur est alimenté par deux signaux sinusoïdaux, $v_{a_0} = V_1 \sin(\omega t)$ et $v_{b_0} = V_1 \sin(\omega t + \pi/2)$ et une grandeur binaire, N , codées sur 8 bits comprise entre -128 et +128. Il fournit deux signaux sinusoïdaux : $v_{REF} = V_M \sin(\omega t)$ et $v_{OUT} = V_M \sin(\omega t + N 1^\circ)$. Cette quantité $N 1^\circ$ est indépendante de la valeur de la fréquence. Une description complète est donnée et des mesures sur un prototype montrent qu'une erreur de phase, entre v_{OUT} et v_{REF} , dans la limite $\pm 1^\circ$ peut être obtenue pour des fréquences inférieures à 1MHz.*

MOTS-CLÉS : *électronique Analogique, traitement du signal*

Introduction

Deux des méthodes les plus connues pour construire un générateur sinusoïdal biphasé contrôlé numériquement sont basées sur la technique de lecture des différentes valeurs du signal dans une table [1] ou sur la méthode de Synthèse Directe de fréquence [2-3]. Cependant, en employant ces méthodes, les signaux obtenus sont composés d'un ensemble de niveaux de tension qui se suivent l'un après l'autre ce qui entraîne un mauvais taux de distorsion si l'on n'applique pas un filtrage sévère des harmoniques parasites. Une nouvelle technique analogique qui permet d'obtenir des signaux sinusoïdaux 'purs' a été décrite dans [4]. Sa résolution de phase était $90/2^N$ où N était le nombre de blocs élémentaires constituant le processeur de phase. Dans ce papier, nous proposons une

version améliorée de cette réalisation : pour une valeur de résolution de phase équivalente, environ 1° , le nombre de blocs élémentaires est diminué (3 au lieu de 6) et la résolution de phase est égale à 1.0° (au lieu d'environ 1.4°)...

Principe.

Comme indiqué figure 1, cet oscillateur sinusoïdal biphasé est alimentée par deux signaux sinusoïdaux (va_0 et vb_0) et une information numérique, N (b_7 à b_0), qui est un nombre entier ($-128 < N < 128$) codé en binaire naturel. Il fournit deux signaux : $v_{REF} = V_M \sin(\omega t)$ et $v_{OUT} = V_M \sin(\omega t + N \Delta\Phi)$. L'incrément $\Delta\Phi$ est égal à 1° .

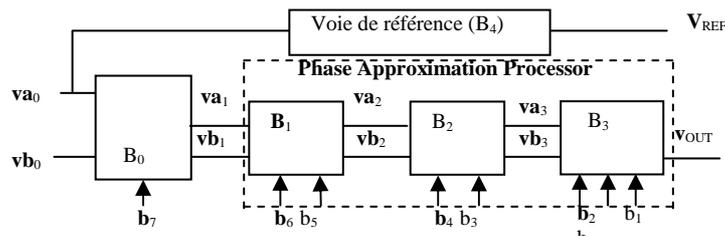


Figure 1. Schéma bloc du dispositif.

Le signe de la phase du signal v_{OUT} est fabriqué par le bloc B_0 qui fournit deux signaux : $va_1 = V \sin(\omega t)$ et $vb_1 = V \sin(\omega t + k \cdot 128^\circ)$ avec $k = +1$, si $b_7 = 0$ et -1 pour $b_7 = 1$. Le deuxième bloc, appelé 'Phase Approximation Processor', est constitué en trois blocs élémentaires, B_1 , B_2 et B_3 . Selon les valeurs du couple b_6 - b_5 , le bloc B_1 sélectionne un des quatre domaines de phase : 0 à $k \cdot 32^\circ$, $k \cdot 32^\circ$ à $k \cdot 64^\circ$, $k \cdot 64^\circ$ à $k \cdot 96^\circ$, $k \cdot 96^\circ$ à $k \cdot 128^\circ$ dans lequel la phase $N \Delta\Phi$ doit être assignée. Le domaine de phase choisi est traité par le bloc B_2 , qui divise l'intervalle de phase retenu en quatre parties égales (ayant chacune une largeur de phase égale à 8°) et, selon la valeur du couple b_4 - b_3 , envoie au bloc B_3 le domaine de phase dans lequel la phase $N \Delta\Phi$ est incluse. Finalement, le bloc B_3 limitera, selon la valeur du triplet b_2 - b_1 - b_0 , la largeur de l'intervalle de phase à une valeur de 1° . Supposons que la phase voulue soit égale à

54.5° : le Bloc B₀ donnera $V_{a1} = V \sin(\omega t)$ et $V_{b1} = V \sin(\omega t + 128^\circ)$. Le bloc B₁ donnera $v_{a2} = V \sin(\omega t + 32^\circ)$ et $v_{b2} = V \sin(\omega t + 64^\circ)$; le bloc B₂ donnera $v_{a3} = V \sin(\omega t + 48^\circ)$ et $v_{b3} = V \sin(\omega t + 56^\circ)$ et le bloc B₃ donnera $v_{OUT} = V \sin(\omega t + 54^\circ)$.

Analyse du fonctionnement.

Premier bloc (B₀).

Le schéma de ce bloc est donné figure 2, il est alimenté par $v_{a0} = V_1 \sin(\omega t)$ et $v_{b0} = V_1 \sin(\omega t + \pi/2)$. Les Amplificateurs Opérationnels sont supposés idéaux, le commutateur S est fermé quand $b_7 = 0$. Une analyse classique montre que l'on a

$$v_{b1} = -v_{a0} \cos(52^\circ) + v_{b0} \sin(52^\circ) = V \sin(\omega t + 128^\circ) \text{ quand } b_7 = 0$$

$$v_{b1} = -v_{a0} \cos(52^\circ) - v_{b0} \sin(52^\circ) = V \sin(\omega t - 128^\circ) \text{ quand } b_7 = +1.$$

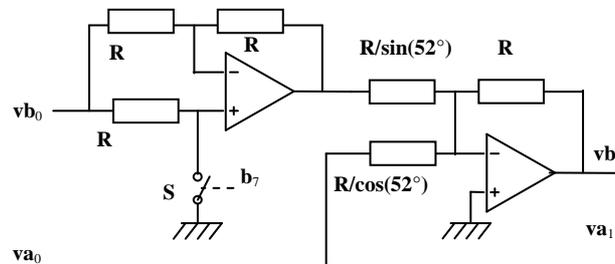
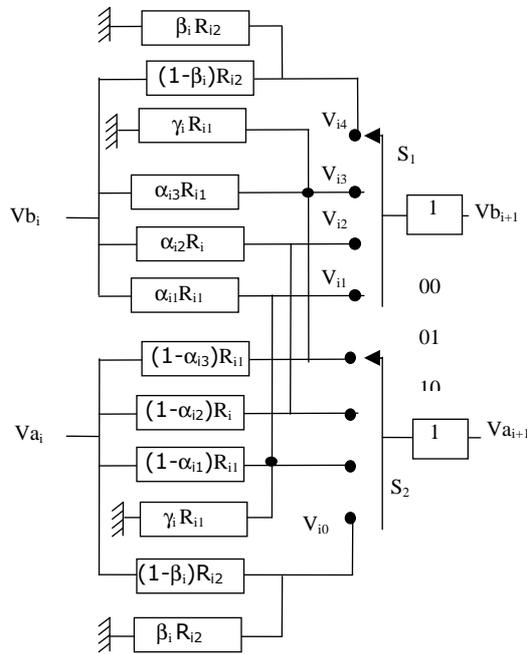


Figure 2. Schéma du bloc B₀.

Le processeur d'approximation de phase (blocs B₁, B₂ et B₃)



Les deux premiers blocs élémentaires, B₁ et B₂, doivent diviser un intervalle de phase en quatre parties égales; ils ont la même structure rappelée figure 3. Ils sont commandés par 2 signaux analogiques

$$va_i = V_i \sin(\omega t + \phi_i)$$

$$vb_i = V_i \sin(\omega t + \phi_i + \Delta\Phi_i)$$

avec $i = 1$, $\Delta\Phi_i = 128^\circ$ et $\Phi_i = 0$ pour le bloc B₁

et $i = 2$, $\Delta\Phi_i = 32^\circ$ et $\Phi_i = k 32^\circ$ (avec $k = 0, 1, 2$ ou 3) pour bloc B₂.

Figure 3. Les additionneurs des blocs B₁ et B₂.

Les trois frontières séparant les quatre domaines de phase sont obtenues en employant des additionneurs analogiques : $\alpha_{ik}R_i$ et $(1-\alpha_{ik})R_i$ pour $k = 2$; $\alpha_{ik}R_{i1}$ et $(1-\alpha_{ik})R_{i1}$ pour $k = 1$ ou 3. Les valeurs des différent α_{ik} sont obtenues en résolvant :

$$\frac{(1-\alpha_{ik})\sin(\Delta\Phi_i)}{\alpha_{ik} + (1-\alpha_{ik})\cos(\Delta\Phi_i)} = \tan\left(k \frac{\Delta\Phi_i}{4}\right) \quad (1)$$

On obtient :

$$\alpha_{ik} = \frac{\sin\left(\left(\frac{k}{4}-1\right)\Delta\Phi_i\right)}{\sin\left(\left(\frac{k}{4}-1\right)\Delta\Phi_i\right) - \sin\left(k \frac{\Delta\Phi_i}{4}\right)} \quad (2)$$

A partir de ces valeurs de α_{ik} , on peut, en remplaçant va_i et vb_i par leur valeur, démontrer que l'amplitude du signal de sortie est égale à :

$$V_{ik} = V_M \sqrt{[\alpha_{ik} + (1 - \alpha_{ik}) \cos(\Delta\Phi_i)]^2 + [(1 - \alpha_{ik}) \sin(\Delta\Phi_i)]^2} \quad (3)$$

On peut facilement vérifier que $\alpha_{i3} = 1 - \alpha_{i1}$, ce qui conduit à :

$$V_{i1} = V_{i3} = V_M \frac{\cos\left(\frac{\Delta\Phi_i}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\Delta\Phi_i}{4}\right)} \quad \text{et} \quad V_{i2} = V_M \cos\left(\frac{\Delta\Phi_i}{2}\right) \quad (4)$$

L'équation 4 montre que V_{i2} est inférieur à V_{i1} (ou V_{i3}). Il est donc nécessaire d'atténuer des voies 1 (et 3) en ajoutant une résistance $\gamma_i R_{i1}$ sur l'additionneur $\alpha_{i1} R_{i1}$, $(1 - \alpha_{i1}) R_{i1}$ et sur l'additionneur $\alpha_{i3} R_{i1}$, $(1 - \alpha_{i3}) R_{i1}$. Comme $\alpha_{i3} = 1 - \alpha_{i1}$, la quantité $\alpha_{i1}(1 - \alpha_{i1})$ est égale à $\alpha_{i3}(1 - \alpha_{i3})$; cette valeur commune sera nommée $\alpha_i(1 - \alpha_i)$. La valeur de γ_i est obtenue en résolvant :

$$\frac{\gamma_i}{\gamma_i + \alpha_i(1 - \alpha_i)} = \cos\left(\frac{\Delta\Phi_i}{4}\right) \quad (5)$$

On obtient :

$$\gamma_i = \frac{1 - 4 \left(\cos\left(\frac{\Delta\Phi_i}{4}\right) \right)^2}{16 \left(\cos\left(\frac{\Delta\Phi_i}{4}\right) \right)^3 \left(\cos\left(\frac{\Delta\Phi_i}{4}\right) - 1 \right)} \quad (6)$$

De la même manière, il est nécessaire d'atténuer les deux voies directes (les signaux v_{i0} et v_{i4} dans la figure 3. Ceci est obtenu en employant des atténuateurs $(1 - \beta_i) R_{i2}$ et $\beta_i R_{i2}$. Cette valeur de β_i est égale à $\cos(\Delta\Phi_i/2)$.

Pour avoir une structure symétrique et ainsi permettre une diminution des erreurs de phase en employant des structures différentielles, il est intéressant d'avoir la même résistance équivalente de Thévenin pour chaque réseau, cela est obtenu si l'on impose aux rapports R_{i1}/R_i et R_{i2}/R_i la condition :

$$\frac{R_{i1}}{R_i} = \frac{-3 \cos\left(\frac{\Delta\Phi_i}{4}\right) + 2 \cos\left(\frac{5\Delta\Phi_i}{4}\right) + \cos\left(\frac{7\Delta\Phi_i}{4}\right)}{2 \cos\left(\frac{3\Delta\Phi_i}{2}\right) - 2} \quad \frac{R_{i2}}{R_i} = \frac{1}{4 \left(1 - \cos\left(\frac{\Delta\Phi_i}{2}\right) \right) \cos\left(\frac{\Delta\Phi_i}{2}\right)} \quad (7)$$

Les valeurs des paramètres α_i , β_i , γ_i et des rapports R_{i1}/R_i , R_{i2}/R_i sont données dans le tableau I. Les commutateurs analogiques S_1 et S_2 conduisent deux des cinq signaux v_{i0} , v_{i1} , v_{i2} , v_{i3} et v_{i4} sur les sorties va_{i+1} and vb_{i+1} .

Bloc	α_1	$\alpha_3 (=1-\alpha_1)$	α_2	β	γ	R_{i1}/R	R_{i2}/R
B ₁	0.65238	0.34761	0.5	0.43837	1.26566	1.2999	1.0154
B ₂	0.74506	0.25493	0.5	0.96126	19.3277	1.3291	6.7136

Tableau 1. Valeur des principaux paramètres pour les blocs B₁ et B₂.

Le signal de sortie, v_{OUT} , du troisième bloc élémentaire (B₃) est obtenu grâce à :

$$v_{OUT} = \frac{va_3(8-k_3) + vb_3k_3}{8} \quad (8)$$

Avec $k_3 = 0...7$. En remplaçant va_3 et vb_3 par leurs valeurs respectives on peut démontrer que, indépendamment de la valeur de k_3 , le gain du circuit est égal à 1 (avec une erreur inférieure à 0.24 %) et que la valeur de phase (ajoutée le signal v_{a3}) est égale à $k_3 * 1^\circ$ (avec une erreur inférieure à 0.0024°). Le signal v_{OUT} est donc égal à :

$$v_{OUT} = V_{II} \sin(\omega t \pm N 1^\circ) \quad (9)$$

Où N est un nombre entier codé en binaire naturel ($128 > N > 0$).

Erreur de phase.

L'équation 9 suppose que tous les composants sont parfaits. L'addition d'une tolérance δ sur la valeur des résistances mène à une erreur de phase dont le cas le plus mauvais est égal à $117^\circ * \delta$ pour le bloc B₁, $16^\circ * \delta$ pour le bloc B₂ et $4^\circ * \delta$ pour le bloc B₃. Ainsi, en employant des résistances avec une tolérance de 0.5% pour le bloc B₁ et 1% pour les blocs B₂ et B₃ on peut espérer une erreur de phase totale maximale inférieure à 0.8° . De plus, l'emploi d'un modèle du premier ordre (pour tenir compte de l'effet des capacités parasites) pour décrire la réponse des blocs B₁ et B₂, mène à une erreur de phase égale à :

$$Phase_{Error} = -\text{Arctan}(R_{TH} C \omega) \quad (10)$$

Où R_{TH} est la résistance de Thévenin équivalente à l'additionneur analogique et C est le condensateur d'entrée des buffers de gain unité. Puisque tous les additionneurs ont la même résistance équivalente (en raison de l'équation 7) et en supposant que tous les buffers de gain unité sont identiques, on obtient la même erreur de phase quelque soit la position des commutateurs. Ceci amène au fait que la différence de phase entre les deux frontières du domaine de phase est sans erreur (seule la valeur médiane du domaine sera faussée). De la même façon, en tenant compte des condensateurs parasites, la réponse du bloc B_3 est celle d'un filtre de passage bas. La complexité du circuit ne permet pas une détermination analytique de l'erreur de phase induite mais des simulations SPICE montrent que l'erreur de phase maximale est d'environ 1° à 500 kHz et 2° à 1MHz.

Résultats.

Seul le processeur d'approximation de phase (blocs B_1 , B_2 , et B_3) montrés figure 1 a été évalué. Le schéma du dispositif testé est donné figure 4. Il a été alimenté par $v_{a1} = 2.4 \sin(\omega t)$ (fourni par un générateur BF classique) et $v_{b1} = 2.4 (\omega t + 128^\circ)$ (obtenu avec l'aide d'un circuit déphaseur pur à chaque fois correctement ajusté). Les valeurs des résistances ont été ajustées avec une tolérance de 0.5% pour le bloc B_0 et 1% pour toutes les autres résistances. Pour des fréquences inférieures à 1MHz, l'amplitude du signal de sortie est égale à 1V, indépendamment de la valeur de phase choisie et sans variation notable quand la valeur de fréquence varie (jusqu'à 1 MHz). Cette valeur est en accord avec la prévision théorique : $2.4 * \cos(64^\circ) * \cos(16^\circ)$.

Les mesures de phase ont été effectuées avec l'aide d'un phasemètre numérique ayant une résolution de phase 0.1° . Un premier jeu de mesures a montré que les deux frontières du domaine de phase disponible aux sorties du bloc B_1 (des signaux v_{a2} et v_{b2}) ont approximativement la même erreur de phase (erreur sur $(\Phi V_{a2} - \Phi V_{a1}) \approx$ erreur sur $(\Phi V_{b2} - \Phi V_{a1}) \approx -2.3^\circ$ à 1MHz). Cette erreur est pratiquement indépendante du domaine de phase choisi. Il en est de même pour les deux frontières du domaine de phase disponible sur les sorties du bloc B_2 (signaux v_{a3} et v_{b3}) qui subissent toutes les deux une erreur de phase d'approximativement -4.6° à 1 MHz (erreur sur $(\Phi V_{a3} - \Phi V_{a1}) \approx$ erreur sur $(\Phi V_{b3} - \Phi V_{a1}) \approx -4.6^\circ$ à 1MHz). D'autre part l'erreur de phase sur le signal disponible sur la sortie

de bloc B₃ (erreur sur $(\Phi V_{OUT} - \Phi V_{a3})$) dépend légèrement de la position du commutateur de ce bloc B₃. L'erreur apportée par ce bloc est minimale (approximativement -1.8° à 1MHz) pour la position 0 du commutateur et passe par un maximum (approximativement -2.8° à 1MHz) pour la position 4. L'erreur de phase totale sur $(\Phi V_{OUT} - \Phi V_{a1})$ (à 1MHz) varie ainsi entre -6.4 ° et -7.4 ° selon la valeur de phase de retard choisie. Dans une première approximation, cette erreur de phase peut être décrite par :

$$\varphi_{ERR} \approx - \arctan(\omega/\omega_0) \quad (16)$$

Pour avoir, à 1 MHz, $\varphi_{ERR} \approx -6.9^\circ$ (valeur médiane de -6.4 et -7.4) il faut choisir $\omega_0 \approx 5,2 \cdot 10^7$. Ainsi, en ajoutant au dispositif un filtre passe-bas (circuit R C associé à un buffer de gain unité) ayant cette fréquence de coupure, on peut obtenir une erreur de phase, entre V_{OUT} et V_{REF} pratiquement indépendante de la valeur de fréquence.

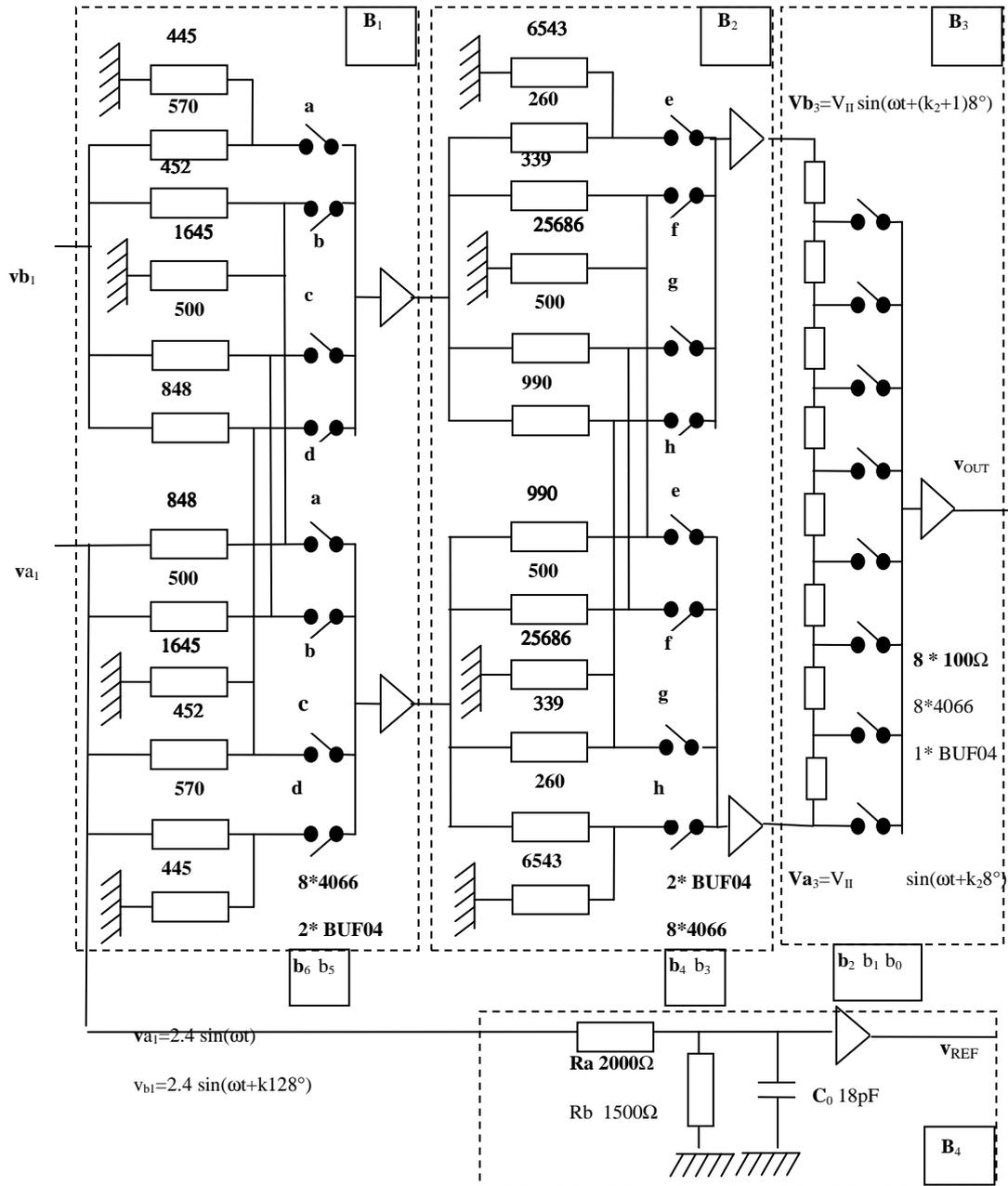
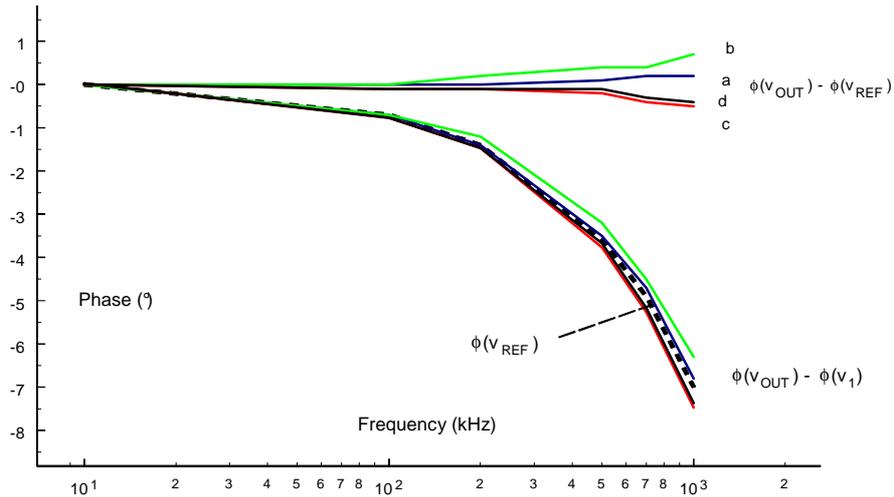


Figure 4. Schéma du dispositif testé.**Figure 5.** Erreurs de phase du 'Phase Approximation Processor'.

a) $\varphi = 7^\circ$; b) $\varphi = 48^\circ$; c) $\varphi = 76^\circ$; d) $\varphi = 107^\circ$;

Conclusion.

L'erreur de phase mesurée sur le prototype est donnée figure 5 pour 4 valeurs de phase de décalage (7° , 48° , 76° et 107°). Ce résultat montre qu'une erreur de phase, entre v_{OUT} et v_{REF} , dans la limite de $\pm 1^\circ$ peut être obtenue quelque soit la phase de décalage choisie pour des fréquences inférieures à 1MHz. Cette précision dépend principalement au soin pris pendant l'ajustement de la valeur des composants et l'ajustement de la différence de phase (128°) des signaux de commande.

Bibliographie

- ¹ Andreas Chrysafis, Motorola Application Note, (1988).
- ² Eva Murphi, Analog Devices Application Note (2004)
- ³ In-Gi Lim and Whaan-Woo Kim, ETRI Journal Vol 26, N 6, 2004, 657-660.
- ⁴ J. Bayard, RSI, Vol. 78, N. 5, May



Jean Bayard a obtenu un doctorat en électronique à l'Université de Lille en 1976 puis l'Agrégation Génie Electrique en 1977. Il a commencé sa carrière d'enseignant chercheur à l'IUT de Calais puis a été nommé Maître de conférences (section 63) à l'IUT de Rouen en 1984. En 1996, il a obtenu l'habilitation à diriger des recherches et a été nommé Professeur d'Université (section 63) à l'IUT d'Alençon en 1998.

Il a créé le laboratoire LURSA de l'IUT d'Alençon et en a été le directeur jusqu'en 2005. Actuellement il enseigne l'électricité et l'instrumentation au département Génie Mécanique et Productique et dans la licence Surveillance et Pilotage des Processus et effectue ses activités de recherche au sein du GREYC (UMR6072) dans le domaine du traitement analogique des signaux.



Anne Marie Bayard a obtenu un Capes de physique Appliquée en 1977. Elle est enseignante à l'IUT de Rouen dans le département Génie Electrique et Informatique Industrielle depuis sa création en octobre 1984. Actuellement elle exerce en tant que Professeur Agrégée en électronique, électricité, électrotechnique et TP de Mathématiques Appliquées à l'Ordinateur et s'intéresse plus particulièrement au traitement analogique des signaux.

Vers une nouvelle interprétation de la procédure d'acquiescement répété

Séverine Halimi-Falkowicz *, **Marie Marchand ****, **David Vaidis *****,
Nicolas Guéguen ****

* IRSIC, Université de la Méditerranée ; IUT d'Aix-en-Provence, Dpt. GEA, 413 avenue Gaston Berger, 13625 Aix-en-Provence cedex 1

** LRP-mip, Université de Toulouse ; UTM-IUT de Figeac; Avenue de Nayrac. F-46100 Figeac

*** LAPPS/LOG, Université d'Orléans, 16 rue d'Issoudun, BP 16729, 45067 Orléans cedex 2

**** LESTIC, Université de Bretagne Sud, 4 rue Jean Zay, BP 92116, 56321 Lorient cedex

**severinehalimi@free.fr ; marie.marchand@univ-tlse2.fr ;
david.vaidis@univ-orleans.fr ; nicolas.gueguen@univ-ubs.fr**

Sections de rattachement : 71 et 16

RÉSUMÉ : *La procédure de l'acquiescement répété est une nouvelle procédure de soumission librement consentie (Joule & Beauvois, 2002). Suggérée par Cialdini et Sagarin (2005), elle consiste à amener le sujet à répondre « oui » à plusieurs questions successives, avant de formuler la requête cible, c'est-à-dire la requête portant sur le comportement attendu. Nous présenterons une expérimentation dans le prolongement direct de celles déjà réalisées. L'objectif, ici, était d'avancer dans l'interprétation théorique de la procédure. Les sujets étaient amenés à répondre à quelques questions impliquant chacune soit la réponse « oui » (condition acquiescement répété), soit la réponse « non » (condition négation répétée). On leur soumettait ensuite une requête cible : accepter de participer à une recherche fastidieuse d'une demi-heure. En condition contrôle, la requête cible était directement soumise aux sujets. Les résultats montrent que la succession de « oui » favorise l'acceptation de la requête (72% en condition d'acquiescement répété vs. 20% en condition contrôle, $p = .01$). Il en est de même pour la succession de « non » (52% en condition de négation répétée vs 20% en condition contrôle, $p = .05$). Les deux conditions expérimentales ne se différencient pas entre elles. Les implications de ces résultats seront discutées.*

MOTS-CLÉS : *Soumission librement consentie, acquiescement répété.*

1. Les procédures de soumission librement consentie

Les procédures permettant d'augmenter la probabilité de voir quelqu'un faire librement ce qu'on attend de lui ont fait l'objet d'applications dans des champs très divers (cf. Cialdini, 1984 ; Girandola, 2003 ; Guéguen, 2004 ; Joule & Beauvois, 1998, 2002), y compris dans le champ de la santé publique. Parmi les plus courantes, on peut citer celles du pied-dans-la-porte (Freedman & Fraser, 1966), de l'amorçage (Cialdini, Cacioppo, Bassett, & Miller, 1978) ou de la porte-au-nez (Cialdini, Vincent, Lewis, Catalan, Wheler, & Lee Darby, 1975). La procédure de pied-dans-la-porte (PDP), par exemple, consiste à amener le sujet à réaliser un premier acte préparatoire peu coûteux, avant de lui proposer de réaliser un second acte, plus coûteux cette fois (comportement attendu). Cette procédure de soumission librement consentie est celle qui a fait l'objet du plus grand nombre de publications. Dans l'expérience princeps de Freedman et Fraser, on proposait aux sujets d'installer, dans leur jardin, un grand panneau publicitaire sur la sécurité routière (comportement attendu). 76% des sujets ont accepté l'installation de ce panneau après avoir accepté, au préalable, d'apposer une petite affichette sur le même thème sur leur fenêtre (acte préparatoire), contre 17% dans le cas d'une demande directe (sans acte préparatoire).

2. L'acquiescement répété : une procédure de soumission librement consentie récemment mise en évidence

Cialdini et Sagarin évoquent, en 2005, une nouvelle façon de procéder pour favoriser l'acceptation d'une requête : selon eux, la probabilité d'acceptation d'une requête devrait être plus grande si, préalablement, le sujet a été amené à répondre « oui » plusieurs fois de suite à une série de questions. Concrètement, il s'agit de poser plusieurs questions spécifiques au sujet dont on recherche le concours : des questions (3, par exemple) qui appellent toutes une réponse « oui ». À l'issue de cette série de questions/réponses « oui », une dernière question est alors posée : il s'agit, cette fois, de la requête cible (requête qui porte

sur un comportement attendu), et la question est formulée de telle sorte que les sujets peuvent répondre par « oui » s'ils le souhaitent. Antérieurement au présent article, la procédure a été étudiée sous les noms d'« acquiescement répété » (AR ; Marchand & Halimi-Falkowicz, 2009 ; Marchand & Joule, 2007) ou de « Yes-in-the-door » (Guéguen, Marchand, Halimi-Falkowicz, Joule, & Courbet, soumis).

L'expérimentation de Marchand & Joule (2007) confrontait une procédure d'AR à une procédure de PDP. D'un point de vue formel, la procédure d'AR ressemble en effet à celle du PDP : dans les deux cas, l'acceptation d'un premier acte préparatoire (i.e., accepter de répondre à une série de questions, dans le cas de l'AR) favorise celle du comportement attendu (requête cible). Dans leur étude, les sujets (des étudiantes d'une université du Sud de la France, toutes fumeuses) étaient amenés à répondre, suivant la condition, soit à 4 questions, soit à 7 questions. Pour une moitié d'entre eux, les questions posées impliquaient toutes, sans exception, une réponse « oui » (conditions d'AR) ; pour l'autre moitié, les questions posées appelaient une réponse extrêmement brève n'impliquant pas une réponse « oui » (conditions de PDP). À l'issue de cette série de questions/réponses, l'expérimentatrice posait aux sujets une dernière question (requête cible) : accepter une privation de tabac de 24 heures (mesure principale). Outre cette mesure déclarative, la venue des sujets au rendez-vous permettait de disposer d'une mesure comportementale (mesure secondaire). Dans une condition contrôle, la requête cible était directement formulée. Les résultats montrent que les fumeurs sont plus enclins à accepter la privation de tabac lorsqu'ils sont soumis à une procédure d'AR (75%), que lorsqu'ils sont soumis à une procédure de PDP (40%), ou encore comparativement à la condition contrôle (15%). Il en est de même en ce qui concerne les privations comportementales effectives (respectivement : 40%, 0%, et 25%). En condition d'acquiescement répété, l'enchaînement de 7 « oui », par rapport à l'enchaînement de 4 « oui », ne s'avère plus efficace ni sur le plan des intentions comportementales (80% vs. 70%), ni sur le plan des comportements effectifs (50% vs. 30%).

La procédure d'AR a depuis fait l'objet de plusieurs répliques (Guéguen et al., soumis ; Marchand & Halimi-Falkowicz), et l'expérimentation présentée ci-dessous s'inscrit dans leur prolongement direct. L'objectif du présent article était d'avancer dans l'interprétation théorique de la procédure. Nous souhaitons savoir si une formulation répétée de « oui » (AR) se distinguait d'une formulation répétée de « non » (négation répétée, NR), lorsque les questions répétées auxquelles les sujets répondent entretiennent un lien de consistance fort avec la requête.

3. Expérimentation

3.1. Sujets

Soixante-quinze sujets femmes (passantes de 18 à 35 ans) étaient abordés individuellement dans les rues d'une ville du Sud-ouest de la France. Les sujets étaient répartis aléatoirement dans l'une des 3 conditions expérimentales.

3.2. Procédure

Les sujets étaient soit soumis à une procédure d'AR, soit soumis à une procédure de négation répétée (NR), soit placés dans une condition contrôle. Dans toutes les conditions, l'expérimentatrice se présentait comme étant chercheur et expliquait réaliser une brève enquête. Dans les conditions expérimentales, elle posait plusieurs questions appelant une réponse « oui » (condition AR) ou « non » (condition NR) aux sujets, puis leur proposait de participer à une recherche d'une demi-heure sur la concentration, impliquant la réalisation d'une tâche fastidieuse (requête cible). Dans la condition contrôle, l'expérimentatrice présentait directement la requête cible.

En condition AR, l'expérimentatrice posait 4 questions appelant une réponse « oui ». Les questions posées étaient les suivantes : (1) « Pensez-vous que les recherches développées aux cours des siècles ont servi aux progrès de l'humanité ? » (2) « Pensez-vous que les chercheurs produisent au fil du temps des connaissances utiles à la société ? » (3) « Pensez-vous que les États doivent continuer à investir dans la recherche ? » (4) « De façon plus générale, pensez-vous qu'il faille encore aujourd'hui continuer à faire de la recherche ? » Les sujets qui répondaient « non » au moins à l'une de ces questions n'étaient pas retenus pour la suite de l'expérience (2 sujets sur 27).

En condition NR, l'expérimentatrice posait également 4 questions. Les questions étaient identiques à celles posées dans le cadre de l'AR mais formulées de manière à favoriser une réponse « non ». Les sujets avaient donc, dans les deux conditions, les mêmes idées en tête (l'expression répétée de « oui » vs. de « non » témoignant de la même adhésion à une opinion donnée : valorisation de la recherche). Les questions posées étaient les suivantes : (1) « Pensez-vous que les recherches développées aux cours des siècles n'ont jamais servi aux progrès de l'humanité ? » (2) « Pensez-vous que les chercheurs ne

produisent au fil du temps que des connaissances inutiles à la société ? » (3) « Pensez-vous que les États doivent cesser d'investir dans la recherche ? » (4) « De façon plus générale, pensez-vous qu'il faille aujourd'hui cesser toute activité de recherche ? » Les sujets qui répondaient « oui » au moins à l'une de ces questions n'étaient pas retenus pour la suite de l'expérience (6 sujets sur 31).

Dans toutes les conditions, l'expérimentatrice introduisait alors la requête cible : « Actuellement je fais une recherche sur la concentration et j'ai besoin de personnes pour y participer. Il s'agit de recopier des signes (*l'expérimentatrice montrait au sujet une feuille avec une multitude de signes issus du test des deux barrages de Zazzo, 1972 – soit une tâche perçue classiquement comme fastidieuse par les sujets*). Cela prend environ une demi-heure. Seriez-vous d'accord pour participer à cette recherche ? » L'acceptation de la requête cible était mesuré par l'accord verbal (ou le refus) donné par le sujet.

3.3. Résultats

Les données ont fait l'objet de Chi². Les résultats (cf. tableau 1) montrent une plus grande efficacité de l'AR (72%) comparativement à la condition contrôle (20% ; $\chi^2_{(1, n=50)} = 13.61, p = .001, \phi = 0.52$). La procédure de NR s'avère également plus efficace (52%) que la condition contrôle (20% ; $\chi^2_{(1, n=50)} = 5.56, p = .05, \phi = 0.33$). Aucune différence significative n'apparaît entre les procédures AR et NR (72% vs. 52% ; $\chi^2_{(1, n=50)} = 2.12, ns., \phi = 0.20$).

Tableau 1 : acceptation de la requête selon les conditions.

AR	NR	Contrôle
72%	52%	20%
(18/25)	(13/25)	(5/25)

Notes : pourcentage de sujets acceptant la requête (les effectifs sont inscrits entre parenthèses).

3.4.3.4. Discussion

Conformément à la suggestion de Cialdini et Sagarin (2005) et comme dans les expérimentations réalisées auparavant (Guéguen et al., soumis ; Marchand & Joule ; Marchand & Halimi-Falkowicz), amener les sujets à répondre « oui » plusieurs fois de suite à une série de questions a permis, dans notre expérimentation, d'augmenter l'acceptation de la requête. Les sujets ont en effet été plus nombreux en condition d'AR qu'en condition contrôle, à accepter de participer à la recherche impliquant la réalisation d'une tâche fastidieuse.

La comparaison entre les procédures AR et NR ne présente cependant pas de différences statistiques en terme d'acceptation de la requête. Pour rappel, si les réponses répétées par les sujets sont différentes suivant la procédure utilisée du simple fait d'une formulation différente des questions répétées (respectivement, pour AR et NR, « oui » vs. « non »), ces réponses traduisent la même adhésion à une valorisation de la recherche (les sujets sont amenés à exprimer la même opinion dans les deux cas). La requête cible consiste, quant à elle, à accepter de participer ultérieurement à une recherche (recherche d'une demi-heure sur la concentration, impliquant la réalisation d'une tâche fastidieuse). Sémantiquement, réponses répétées et requête cible entretiennent donc, indépendamment de la procédure, un lien fort de consistance.

Sur le plan théorique, il ne semble par conséquent pas possible de considérer que la formulation de simples réponses « oui » permet de rendre compte à elle seule des effets obtenus en condition d'AR, dans notre expérimentation. L'adéquation entre la nature de la position idéologique exprimée par les sujets au travers de leurs réponses « oui » ou « non » (i.e., adhésion à une valorisation de la recherche) et la nature de la requête (i.e., accepter de participer à une recherche) pourrait expliquer une partie des effets observés : en d'autres termes, la consistance entre, d'une part, les réponses produites et, d'autre part, la nature de la requête, pourrait optimiser l'obtention des effets d'AR, voire celle de toute procédure de « questionnement répété », que les réponses appellent un « oui » ou un « non ».

Enfin, la procédure de NR pourrait en outre représenter une nouvelle procédure de soumission librement consentie. Amener les sujets à répondre « non » plusieurs fois de suite à une série de questions a en effet permis, dans notre expérimentation, d'augmenter l'acceptation de la requête : les sujets ont été plus nombreux en condition de NR qu'en condition contrôle, à accepter de participer à la recherche impliquant la réalisation d'une tâche fastidieuse.

Les études ultérieures devraient nous permettre d'explorer ces suppositions.

Mise en forme : Puces et numéros

4.4. Bibliographie

Cialdini, R. (1984). *Influence et manipulation*. Paris : First.

Cialdini, R. B., Cacioppo, J. T., Basset, R., & Miller, J. A. (1978). Low-ball procedure for producing compliance: Commitment then cost. *Journal of Personality and Social Psychology*, 36, 463-476.

Cialdini, R. B., & Sagarin, B. J. (2005). Principles of interpersonal influence. In T. C. Brock, M. C. Green (Eds.), *Persuasion: psychological insights and perspectives* (2nd éd. pp. 143-169). Thousand Oaks, CA : Sage.

Cialdini, R. B., Vincent, J. E., Lewis, S. K., Catalan, J., Wheeler, D., & Darby, B. L. (1975). Reciprocal concessions procedure for inducing compliance: The door-in-the-face technique. *Journal of Personality and Social Psychology*, 31, 206-215.

Freedman, J., & Fraser, S. (1966). Compliance without pressure: The foot-in-the-door technique. *Journal of Personality and Social Psychology*, 4, 195-202.

Girandola, F. (2003). *Psychologie de la persuasion et de l'engagement*. Besançon : Presses Universitaires de Franche-Comté.

Guéguen, N. (2004). *Psychologie de la manipulation et de la soumission*. Paris : Dunod.

Guéguen, N., Marchand, M., Halimi-Falkowicz, S., Joule, R.-V., & Courbet, D. The effect of repeating « yes » in a first request on compliance with a later request : the Yes-In-The-Door technique. Article soumis pour publication.

Joule, R.-V., & Beauvois, J.-L. (1998). *La soumission librement consentie*. Paris : Presses Universitaires de France.

Joule, R.-V., & Beauvois, J.-L. (1987). *Petit Traité de Manipulation à l'Usage des Honnêtes Gens*. Grenoble : Presses Universitaires de Grenoble.

Marchand, M., & Halimi-Falkowicz, S. (2009, juin). *L'acquiescement répété : une nouvelle procédure de soumission librement consentie au service de la privation de tabac*, communication présentée au 15ème Colloque National de la Recherche en IUT, Lille, France.

Marchand, M., & Joule, R.-V. (2007, juin). *Privation de tabac et engagement : test d'une nouvelle procédure*. Communication présentée au IVème Congrès International de Psychologie de la Santé en Langue Française, « Psychologie, Santé et Ouverture », Toulouse, France.

Zazzo, R. (1972). *Manuel pour l'examen psychologique de l'enfant (3e éd.)*. Neuchâtel : Delachaux & Niestlé.



Séverine Halimi-Falkowicz est Maître de Conférences en Sciences de l'Information et de la Communication. Membre de l'IRSIC (Institut de Recherche en Sciences de l'Information et de la Communication, EA894), elle enseigne au sein de l'Université de la Méditerranée (IUT d'Aix-en-Provence). Docteur en psychologie (thèse réalisée sous la direction de Robert-Vincent Joule, Professeur de psychologie sociale expérimentale à l'Université de Provence) et psychologue sociale, ses intérêts

de recherche portent en majeure partie sur des problématiques communicationnelles et sur l'influence sociale (communication engageante, nouveaux médias et usages sociaux des TIC, etc.).



Marie Marchand est actuellement Attachée Temporaire d'Enseignement et de Recherche au Centre universitaire de formation et de recherche Jean-François Champollion à Albi, et membre du laboratoire EFEI (Enseignement, formation, éducation, insertion, EA 799). Docteur en psychologie et psychologue sociale, elle a réalisé sa thèse sous la direction de Robert-Vincent Joule, Professeur de psychologie sociale expérimentale à l'Université de Provence. Ses intérêts de recherche portent pour la plupart sur l'influence sociale et ses applications, la communication

engageante, l'engagement et la conduite du changement.



David Vaidis est Maître de Conférences en psychologie sociale à l'Université d'Orléans et membre du Laboratoire Orléanais de Gestion (EA2635). Ses intérêts de recherche portent notamment sur la dissonance cognitive, l'engagement, et de manière générale, sur le rôle des émotions dans les processus d'influence sociale. Il enseigne les approches théoriques et méthodologies de la psychologie sociale au Département de Gestion des Entreprises et des Administration de l'IUT d'Orléans.



Nicolas Guéguen est Professeur des Universités en Sciences du comportement à l'Université de Bretagne-Sud et directeur du laboratoire CRPCC-LESTIC (EA 1285). Ses recherches portent sur les composantes non-verbales et atmosphériques d'influence du comportement notamment celui du consommateur.

Optimisation dimensionnelle d'un robot de télé-échographie

Laurence Nouaille, Natalie Smith-Guerin, Pierre Vieyres et Gérard Poisson

IUT de Bourges - Université d'Orléans
63 Av. de Lattre de Tassigny
18020 Bourges Cedex

**lnouaille@bourges.univ-orleans.fr ;
nsmith@bourges.univ-orleans.fr ;
pvieyres@bourges.univ-orleans.fr ;
gpoisson@bourges.univ-orleans.fr**

**Sections de rattachement : 61
Secteur : Secondaire**

RÉSUMÉ : *Nous présentons dans cet article les différentes optimisations que nous avons réalisées afin de définir les paramètres géométriques caractéristiques d'un robot portable pour la télé-échographie. Cette étape constituant un préliminaire à la conception puis la réalisation de ce robot. Après une introduction sur la télé-échographie robotisée et les robots sériels déjà développés au laboratoire et utilisés par les experts médicaux, nous décrivons le problème lié à la présence d'une singularité géométrique au centre de l'espace de travail de ces robots. Afin de réduire l'effet perturbant qui en résulte, une structure cinématique décalant la singularité est proposée. Les modèles géométriques direct et inverse correspondants, ainsi que le modèle cinématique direct, sont donnés. Les indices d'évaluation des performances cinématiques des robots tels que la manipulabilité et la dextérité sont rappelés. Nous discutons les résultats obtenus à l'issue des différentes optimisations menées. Deux ont été effectuées par une agrégation des critères manipulabilité/compacité ou dextérité/compacité. Puis des optimisations sous contraintes ont été réalisées, autorisant ou interdisant la présence de singularité dans l'espace de travail. Un front de Pareto des solutions a été élaboré. En plus des solutions fabriquées au préalable au laboratoire, nous mettons en évidence deux structures nouvelles : une où la singularité est légèrement écartée de la position centrale, et une, moins compacte, où la singularité est rejetée hors de l'espace de travail. Le choix d'une solution est discuté. La maquette CAO du robot conçu à partir de notre approche d'optimisation est donnée. Celui-ci sera réalisé dans le cadre du projet ANR Prosit (appel ANR Contint 2008), il servira alors à la pratique d'échographies robotisées en milieu hospitalier.*

MOTS-CLÉS : *télé-échographie robotisée, poignet sphérique, singularité, manipulabilité, dextérité, optimisation paramétrique, front de Pareto*

1. Introduction

La télé-échographie robotisée est une pratique qui permet à un médecin spécialiste d'effectuer un diagnostic échographique à distance, et en « temps réel », via l'utilisation d'un robot qui déplace sur un patient distant une sonde échographique à la demande de ce médecin. La chaîne de télé-échographie, voir figure 1, est constituée d'un poste maître où est situé l'expert médical, d'un poste patient avec le robot porte-sonde, et d'un lien de communication entre les deux postes pour transmettre à la fois les consignes de mouvement émises par l'expert vers le poste patient et en retour les images échographiques acquises au poste patient, qui sont ensuite affichées sur un écran au poste maître. La pratique est identique quel que soit l'éloignement (de quelques mètres à des milliers de km), seul le délai de transmission peut varier. Le médecin pilote le robot distant grâce à un joystick instrumenté, appelé « fausse sonde » jusqu'à trouver l'incidence recherchée de la sonde ultrasonore sur l'organe ausculté. Il élabore alors son diagnostic à partir des images échographiques reçues et a toute latitude pour contrôler l'orientation et le déplacement de la sonde, comme s'il pratiquait une échographie classique.

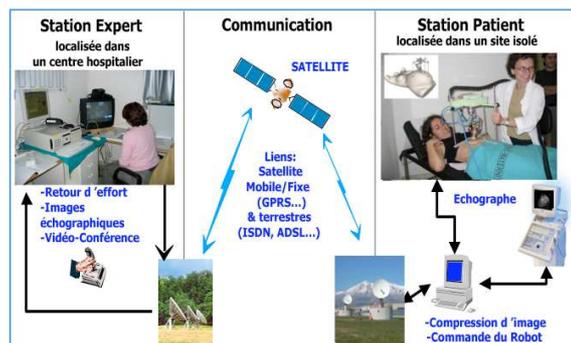


Figure 1 . La chaîne de télé-échographie

2. Les robots de télé-échographie

Notre laboratoire (Laboratoire Vision & Robotique devenu Prisme) est impliqué depuis 15 ans dans l'étude, la réalisation et la validation médicale de robots porte-sonde pour la télé-échographie. Au travers divers projets au cours de ces années, nous avons développé différentes solutions cinématiques permettant de répondre à l'expression des besoins médicaux exprimés. Globalement, pendant la phase de diagnostic, le médecin modifie l'orientation de sa sonde distante en pilotant ses 3 rotations, et tout en s'assurant qu'il conserve au cours de son geste, le même point d'appui sur la peau du patient. Il s'agit donc, qu'à minima, le robot porte-sonde puisse assurer un mouvement de type poignet sphérique à centre de rotation déporté. Ainsi, les prototypes que nous avons développés possèdent tous une structure sérielle à trois articulations pivots concourantes. L'extrémité de la sonde est disposée en ce point de concourance.

Premier des prototypes réalisés, le robot Syrtech, avec 3 degrés de liberté (ddl) en rotation a été conçu selon ce principe. Il a été utilisé, en 1998, pour valider le concept de télé-échographie par téléopération entre Bourges et Katmandou. La première télé-échographie robotisée a ainsi été réalisée via la communication satellite INMARSAT-B sur un patient situé à Katmandou par un expert médical situé à Bourges.

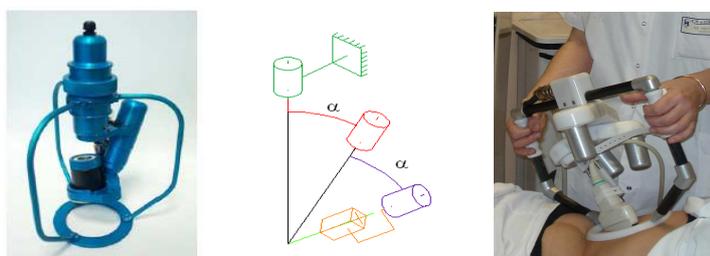


Figure 2 . Les robots Teresa et Estele (4 ddl)

Les robots Teresa et Estele, représentés figure 2, possèdent aussi cette structure à 3 ddl en rotation. Ils ont en plus un 4^e ddl servant à gérer la translation longitudinale de la sonde et servant à contrôler la force d'appui de celle-ci sur le patient. Teresa (voir aussi figure 1) a été développé en 2001 dans un projet en partenariat avec l'Agence Spatiale Européenne (ESA) comme pré-prototype servant à définir les spécifications d'un futur robot équipant la navette spatiale internationale. Estele a été développé en 2007 sous le financement de l'Agence

Régionale de l'Hospitalisation (ARH) en Région Centre. Il équipe à ce jour quatre hôpitaux en Région Centre (Tours, Loches, Vendôme et Bourges) et est utilisé dans le cadre d'une « phase pilote » de validation médicale.

Les robots Otelo1 et Otelo2 (voir figure 3) ont été réalisés en 2002 et 2004 dans le cadre du projet européen Otelo (*IST-2001-32516*). Ils présentent la structure de type poignet à trois rotations concourantes et 3 ddl supplémentaires en translation, assurant comme sur Teresa un enfoncement de la sonde pour gérer l'effort et en plus un déplacement latéral sur la peau du patient, augmentant de fait l'espace de visualisation.

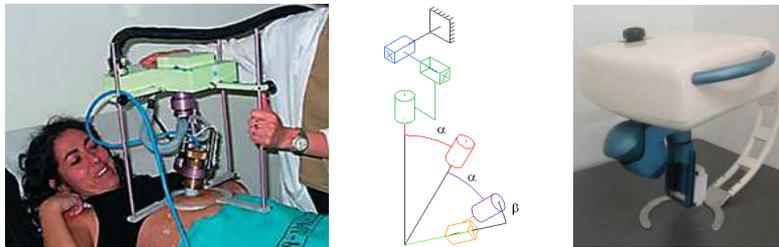


Figure 3 . Les robots Otelo 1 et Otelo 2 (6 ddl)

3. La problématique de la singularité centrale

Toutes les structures robotiques préalablement réalisées sont compactes, légères et portables, elles offrent de plus un espace de travail correspondant au besoin médical. Elles sont donc largement appréciées sur ces points par les praticiens (Arbeille 2007). Cependant, comme tout mécanisme poly-articulé, les architectures cinématiques de nos poignets sphériques sériels présentent des singularités géométriques. L'une, dite de frontière, figure 4 au centre, est atteinte lorsque les trois axes des articulations pivots sont coplanaires ; l'autre, dite singularité centrale correspond à la coïncidence des axes des articulations 1 et 3, figure 4 à gauche. Dans les deux situations, la singularité entraîne que localement le robot peut présenter une dégradation de ses capacités de mobilité. Le suivi de trajectoire se traduit alors, au voisinage de la singularité, par des débattements articulaires (ou rotations moteurs) d'assez grande amplitude bien que le geste du médecin reste très fin. Ceci concerne essentiellement

l'articulation 1. Ainsi, alors que le déplacement de la sonde doit rester doux, les déplacements des segments du robot sont parfois jugés trop brusques, perturbant de ce fait le mouvement réel de la sonde, et pouvant donc nuire au confort du diagnostic.

Comme classiquement dans toute situation robotique en présence de singularités, une gestion par la commande a été apportée. Celle que nous avons développée exploite la redondance des mouvements de précession et rotation propre de la sonde (rotations R1, respectivement R3, figure 4) et tolère un faible écart angulaire entre l'orientation demandée par l'expert et celle réellement appliquée à la sonde (Courrèges 2009). Si ce principe de commande améliore significativement la téléopération, il reste que la suppression de singularités dans l'espace de travail est une question récurrente.

Le traitement de la singularité de frontière a toujours été facilement réalisé, sur tous nos robots, en limitant le mouvement de nutation de la sonde à une valeur légèrement inférieure à l'angle de nutation maximal toléré par le mécanisme (on évite ainsi toute navigation dans la zone frontière). On ne peut cependant pas traiter la singularité centrale de la même façon : la position de la sonde normale à la peau est celle que privilégie l'expert médical en phase d'initialisation de son diagnostic, et il y revient par ailleurs assez souvent ; cette configuration doit donc rester dans l'espace de travail.

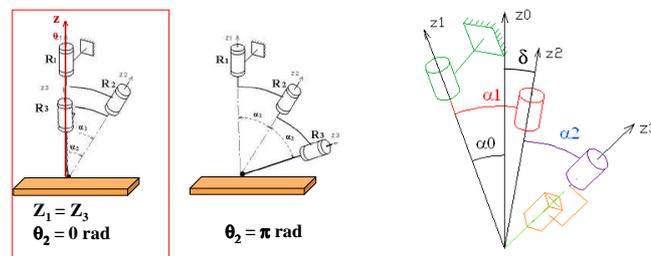


Figure 4 . Singularité centrale et singularité frontière des poignets sphériques à 3 ddl ; Structure à 4 ddl avec poignet sphérique incliné (angle α_0)

L'idée de déplacer l'axe de la première rotation (donc la singularité centrale) hors de l'espace de travail a été suggérée à de nombreuses reprises, mais si nous n'avons sur aucun de nos prototypes exploité cette approche, c'est qu'elle est toujours été considérée comme

simpliste. En effet, le rejet de singularité impose inévitablement un accroissement important de l'encombrement du robot, ce qui le rendrait inopérable. Cette solution a été retenue par le Cnes et ses partenaires en 2007 dans le cadre de l'appel d'offre ESA-ARTIS (ESA-Webpage 2010). Un robot a été construit. S'il déporte le problème de la singularité, il est par contre bien plus encombrant. Afin de ne pas aboutir à une solution trop lourde, non acceptée par un patient, les segments de ce robot ont été conçus en privilégiant la légèreté. Le système est ainsi excessivement flexible, et donc difficilement téléopérable. Nous n'avons pas connaissance de publication concernant ce projet.

Dix années de tests médicaux et les améliorations successives apportées au développement des sept prototypes distincts que nous avons réalisés ont montré que la viabilité d'un robot de télé-échographie tient aux trois critères essentiels que sont 1) le respect d'un espace de travail minimal, 2) la précision des mouvements du porte-sonde, et 3) la légèreté et compacité globale du robot (Courreges 2008). Concevoir une structure cinématique efficace ne peut se faire qu'en considérant ces contraintes, et sachant qu'elles sont antagonistes, la solution sera forcément un compromis.

Nous nous sommes proposés (Nouaille-2009), de mener une étude d'optimisation sur une structure nouvelle, restant cependant composée d'un poignet sphérique à 3 ddl et d'un module de translation de la sonde à 1 ddl. L'axe de l'articulation 1 est simplement déplacé de la verticale, décalant la singularité centrale hors de la zone la plus fréquentée par le médecin (figure 4 à droite).

σ_i	d_{i-1}	r_i	α_{i-1}	θ_i
0	0	0	α_0	θ_1
0	0	0	α_1	θ_2
0	0	0	α_2	θ_3
1	0	r_4	0	0

Tableau 5 . Paramètres de Denavit et Hartenberg modifiés de la nouvelle structure

4. Modèles géométriques direct et inverse, modèle cinématique

On modélise cette nouvelle structure en considérant le formalisme de « Denavit et Hartenberg modifié ». Les paramètres correspondants sont donnés tableau 5. Pour caractériser l'espace de travail conique, l'orientation de la sonde est définie par les angles d'Euler (Précession ψ ; Nutation θ ; et Rotation propre φ).

L'expression du modèle géométrique direct est donnée ci-dessous. Celui-ci permet d'exprimer l'orientation (ψ , θ , φ) à partir des coordonnées articulaires :

$$\theta = \pm \text{Arc cos}(a_z) \quad [1]$$

$$\varphi = \text{ATAN2}\left(\frac{s_z}{s\theta}, \frac{n_z}{s\theta}\right) \quad [2]$$

$$\psi = \text{ATAN2}\left(\frac{a_x}{s\theta}, -\frac{a_y}{s\theta}\right) \quad [3]$$

Avec :

$$s_z = (s\alpha_0 s\theta_1 c\theta_2 + s\alpha_0 c\theta_1 c\alpha_1 s\theta_2 + c\alpha_0 s\alpha_1 s\theta_2) c\theta_3 + (-s\alpha_0 s\theta_1 s\theta_2 + s\alpha_0 c\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 + c\alpha_0 s\alpha_1 c\theta_2) c\alpha_2 s\theta_3 + (-s\alpha_0 c\theta_1 s\alpha_1 + c\alpha_0 c\alpha_1) s\alpha_2 s\theta_3. \quad [4]$$

$$n_z = -(s\alpha_0 s\theta_1 c\theta_2 + s\alpha_0 c\theta_1 c\alpha_1 s\theta_2 + c\alpha_0 s\alpha_1 s\theta_2) s\theta_3 + (-s\alpha_0 s\theta_1 s\theta_2 + s\alpha_0 c\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 + c\alpha_0 s\alpha_1 c\theta_2) c\alpha_2 c\theta_3 + (-s\alpha_0 c\theta_1 s\alpha_1 + c\alpha_0 c\alpha_1) s\alpha_2 c\theta_3. \quad [5]$$

$$a_x = (c\theta_1 s\theta_2 + s\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2) s\alpha_2 + s\alpha_1 s\theta_1 c\alpha_2. \quad [6]$$

$$a_y = -(c\alpha_0 s\theta_1 s\theta_2 + c\alpha_0 c\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 - s\alpha_0 s\alpha_1 c\theta_2) s\alpha_2 - (c\alpha_0 c\theta_1 s\alpha_1 + s\alpha_0 c\alpha_1) c\alpha_2. \quad [7]$$

$$a_z = -(s\alpha_0 s\theta_1 s\theta_2 + s\alpha_0 c\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 + c\alpha_0 s\alpha_1 c\theta_2) s\alpha_2 + (-s\alpha_0 c\theta_1 s\alpha_1 + c\alpha_0 c\alpha_1) c\alpha_2. \quad [8]$$

Le modèle géométrique inverse s'en déduit. Il permet de définir les coordonnées articulaires (θ_1 , θ_2 , θ_3) à partir de l'orientation (ψ , θ , φ). Il s'écrit alors :

$$c\theta_2 = \frac{c\alpha_0 c\theta + s\alpha_0 c\psi s\theta - c\alpha_1 c\alpha_2}{-s\alpha_1 s\alpha_2} \quad [9]$$

$$\theta_1 = \text{ATAN2}(s\theta_1, c\theta_1) \quad [10]$$

$$\begin{cases} c\theta_1 = \frac{1}{\Delta} [(c\alpha_1 s\alpha_2 c\theta_2 + s\alpha_1 c\alpha_2)(s\alpha_0 c\theta - c\alpha_0 c\psi s\theta) - s\alpha_2 s\theta_2 (s\psi s\theta)] & [11] \\ s\theta_1 = \frac{1}{\Delta} [-(c\alpha_1 s\alpha_2 c\theta_2 + s\alpha_1 c\alpha_2)(s\psi s\theta) - s\alpha_2 s\theta_2 (s\alpha_0 c\theta - c\alpha_0 c\psi s\theta)] & [12] \end{cases}$$

$$\text{Avec : } \Delta = -(c\alpha_1 s\alpha_2 c\theta_2 + s\alpha_1 c\alpha_2)^2 - (s\alpha_2 s\theta_2)^2 \quad [13]$$

$$\theta_3 = \text{ATAN}2(s\theta_3, c\theta_3) \quad [14]$$

$$\text{Avec : } s\theta_3 = \frac{s\varphi X - c\varphi Y}{s\theta} \quad \text{et} \quad c\theta_3 = \frac{c\varphi X + s\varphi Y}{s\theta} \quad [15]$$

$$\text{Et : } X = (-s\alpha_0 s\theta_1 s\theta_2 + s\alpha_0 c\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 + c\alpha_0 s\alpha_1 c\theta_2) c\alpha_2 + (-s\alpha_0 c\theta_1 s\alpha_1 + c\alpha_0 c\alpha_1) s\alpha_2 \quad [16]$$

$$Y = s\alpha_0 s\theta_1 c\theta_2 + s\alpha_0 c\theta_1 c\alpha_1 s\theta_2 + c\alpha_0 s\alpha_1 s\theta_2 \quad [17]$$

L'écriture du modèle cinématique se ramène à la détermination de la matrice jacobienne. Le robot étant à 4 ddl, celle-ci est de dimension 4. Cependant, dès lors que nous évaluons des performances cinématiques par la capacité du robot à gérer les orientations, nous nous limiterons à l'étude de la matrice réduite J_ω correspondante.

$$J_\omega = \begin{bmatrix} 0 & 0 & s\alpha_2 s\theta_2 \\ 0 & -s\alpha_1 & -c\alpha_1 s\alpha_2 c\theta_2 - s\alpha_1 c\alpha_2 \\ 1 & c\alpha_1 & -s\alpha_1 s\alpha_2 c\theta_2 + c\alpha_1 c\alpha_2 \end{bmatrix}_{R_1} \quad [18]$$

5. Optimisations et discussion

L'objectif est de déterminer une configuration pour le triplet des paramètres géométriques caractéristiques $(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2)$ telle que la solution robotique correspondante satisfasse le besoin médical exprimé. On devrait dire alors que l'on a une solution « appropriée » au besoin car c'est un vocable qui convient bien mieux que celui d'optimal, dans la mesure où la solution en question n'est pas un optimal global au sens mathématique du terme et qu'il est impossible de prouver qu'elle est la meilleure.

Cependant, dès lors que nous avons ramené cette recherche de solution à un problème de maximisation d'un critère, nous utiliserons quand même le terme optimisation. Celle-ci est menée en cherchant à la fois à améliorer la performance cinématique globale du robot et à conserver un bon critère de compacité, tout cela en respectant la contrainte d'un espace de travail satisfaisant.

Une première approche a été de déterminer les trois angles α_i de manière découplée. Cependant, si α_1 diffère de α_2 , un cône de demi-angle $|\alpha_1 - \alpha_2|$ est inaccessible autour de l'axe de la première articulation. Il faut alors repousser ce cône hors de l'espace de travail obligatoire, conduisant à un robot très encombrant voire inopérable (cf. remarque concernant le robot du Cnes au §3). Nous avons donc choisi d'imposer $\alpha_1 = \alpha_2$, et par là même de n'optimiser que le couple (α_0, α_1) .

La contrainte d'espace de travail se résume à la capacité de mouvoir la sonde dans un cône de demi-angle au sommet 35° au minimum. Pour satisfaire la contrainte de sécurité (pas de heurt entre les parties mobiles du robot et le corps du patient), nous imposons une marge de 15° entre le cône enveloppe des parties mobiles du robot et le plan perpendiculaire à l'axe de symétrie de ce robot (tout segment mobile doit rester dans un cône de demi-angle au sommet 75°).

Nous présentons les résultats obtenus à l'issue de quatre approches d'optimisation : la première par agrégation des critères manipulabilité globale et compacité, la deuxième par agrégation des critères dextérité et compacité. En troisième approche, nous menons une optimisation des critères de manipulabilité (puis dextérité) sous contraintes en excluant la présence de singularité dans l'espace de travail. La quatrième est une optimisation sous contraintes, tolérant une singularité dans l'espace de travail.

5.1. Optimisation avec agrégation de la manipulabilité globale et de la compacité

Nous considérons ici la fonction objectif f_{oi} qui combine la compacité C_g du robot et la manipulabilité globale w_g .

$$f_{oi} = \gamma_1 \times C_g + (1 - \gamma_1) \times w_g \quad \text{avec} \quad \gamma_1 \in [0,1] \quad [19]$$

La manipulabilité locale w (manipulabilité de Yoshikawa, Yoshikawa-1985) caractérise, pour une configuration donnée des paramètres articulaires, le volume de l'ellipsoïde des vitesses opérationnelles. Elle est

aussi obtenue par le calcul du déterminant de la matrice jacobienne : $w = \det(J_w) = s\alpha_1 s\alpha_2 s\theta_2$. Nous définissons la manipulabilité globale comme la manipulabilité moyenne pondérée. Elle est définie par l'intégrale sur l'espace de travail du produit de la manipulabilité locale et de la probabilité de répartition $f(\theta)$ de la sonde échographique dans cet espace, voir figure 6, (Nouaille 2008). Nous avons modélisé cette probabilité de répartition à partir de l'analyse du geste et de la mesure des paramètres angulaires d'Euler enregistrés lors de la pratique d'échographies réelles.

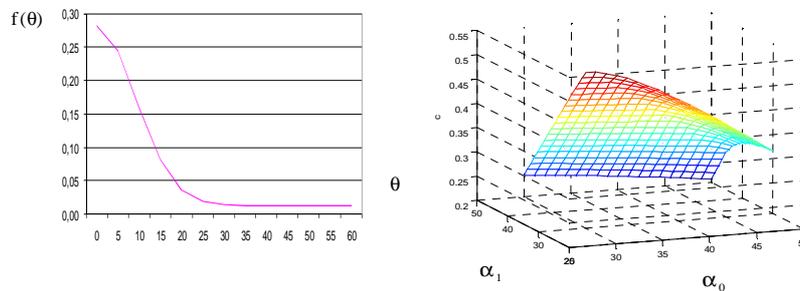


Figure 6 . A gauche : Probabilité $f(\theta)$ de répartition de l'inclinaison θ de la sonde. A droite : compacité C_g du robot en fonction de α_0 et α_1

La compacité du mécanisme est définie par l'espace balayé par le mécanisme pendant son fonctionnement (voir figure 6). L'angle du cône qui enveloppe la structure pendant le balayage de l'espace de travail, est égal à l'angle maximal d'inclinaison que peut prendre le poignet sphérique incliné, soit δ . Cet angle est donné par la position de l'axe z_2 de l'articulation 2 par rapport à z_0 , l'axe normal à la peau, figure 4.

Pour cette optimisation, la fonction objectif présente un maximum pour la valeur particulière $\gamma_1 = 0,513$ et donne comme solution robotique : $\alpha_0 = 45^\circ$ et $\alpha_1 = 42^\circ$. La singularité centrale est alors nettement rejetée hors de l'espace de travail du robot.

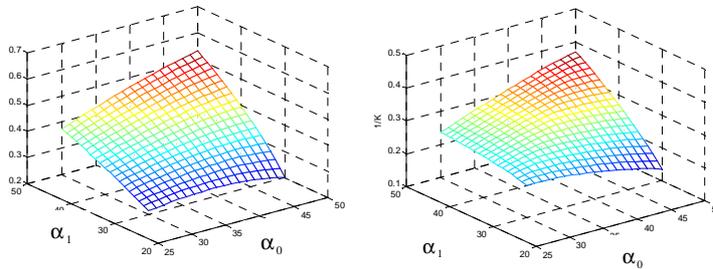


Figure 7. A gauche : Manipulabilité globale w_g en fonction de α_0 et α_1
A droite : dextérité globale η_g en fonction de α_0 et α_1

5.2. Optimisation avec agrégation de la dextérité globale et de la compacité

Nous considérons cette fois une fonction objectif f_{o2} qui combine compacité C_g et dextérité η_g .

$$f_{o2} = \gamma_2 \times C_g + (1 - \gamma_2) \times \eta_g \quad \text{avec} \quad \gamma_2 \in [0,1] \quad [20]$$

La dextérité η caractérise la sphéricité de l'ellipsoïde des vitesses opérationnelles, elle est calculée par l'inverse du nombre de conditionnement de la matrice jacobienne $J\omega$. $\eta = 1/K(J\omega)$. Comme la manipulabilité, c'est un indice local. L'indice global η_g est défini de la même façon que précédemment, par une intégrale, *Gosselin-1991*.

L'optimisation montre que les solutions qui sont telles que $\alpha_0 = \alpha_1$ sont toutes optimales dès lors que α_i est compris entre 35° et 50° .

5.3. Optimisation sous contraintes de la performance cinématique.

Nous avons réalisé la troisième optimisation en utilisant une méthode d'optimisation d'une fonction sous contraintes. La fonction considérée est la manipulabilité dans un premier temps puis la dextérité dans un second. Les contraintes, au nombre de trois, sont celles de l'espace accessible. Les spécifications du cahier des charges d'un robot de télé-échographie ont été déterminées par Lama Al Bassit lors de

l'étude du geste médical lors d'examen échographiques courants, (Al-Bassit-2005).

Il est ainsi montré que l'espace de travail obligatoire est conique de demi-angle au sommet $\theta_n = 35^\circ$. Cela se traduit par la première contrainte :

$$i) \quad \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_0 \geq \theta_n \quad [21]$$

La contrainte de sécurité imposant un angle maximal d'inclinaison du système pour que le robot n'entre pas en collision avec le patient s'exprime par l'inéquation :

$$ii) \quad \alpha_1 + \theta_n \leq \theta_s \quad [22]$$

Pour rejeter la singularité en dehors de l'espace de travail, l'angle α_0 doit être tel que :

$$iii) \quad \alpha_0 \geq \theta_n \quad [23]$$

Avec respect des 3 contraintes *i)*, *ii)* et *iii)* on montre que la manipulabilité w_g est maximale si $\alpha_0 = 45^\circ$ et $\alpha_1 = 40^\circ$. La dextérité η_g est maximale quand à elle pour des valeurs très proches ($\alpha_0 = 42^\circ$ et $\alpha_1 = 40^\circ$). La valeur optimale pour les deux critères de performance cinématique est obtenue pour la valeur maximale de α_1 autorisée pour respecter la contrainte de sécurité, soit 40° .

Afin de retenir une solution optimale nous avons fait le choix de la performance cinématique la plus appropriée aux contraintes du robot de télé-échographie. Un tel robot a besoin de se déplacer dans toutes les directions avec la même facilité. En revanche, la précision est moins importante du fait que le médecin pilote la sonde fictive et corrige la position de la sonde réelle en fonction de l'image échographique reçue. Pour ces raisons, nous pouvons considérer que la dextérité η_g est le critère traduisant le mieux ce besoin. La solution cinématique correspondante est représentée (figure 8).

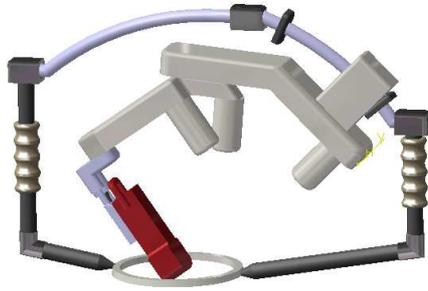


Figure 8 . *Maquette CAO issue de l'optimisation sous contrainte*

5.4. Optimisation sous contrainte : singularité autorisée dans l'espace de travail

Une dernière optimisation a alors été effectuée par la méthode d'agrégation des critères dextérité η_g et compacité C_g en imposant un angle d'espace de travail de 35° et autorisant la possibilité de singularité dans l'espace de travail. Seule les contraintes *i)* et *ii)* sont alors considérées. L'agrégation de ces 2 critères, fait apparaître, du fait de la prise en compte du critère compacité, des solutions cinématiques plus compactes, mais avec présence de singularité dans l'espace de travail. Conserver la contrainte *iii)* n'aurait pas eu ici d'intérêt. Nous obtenons alors le champ des solutions optimales, représenté figure 8, (Nouaille-2009 et Nouaille 2010).

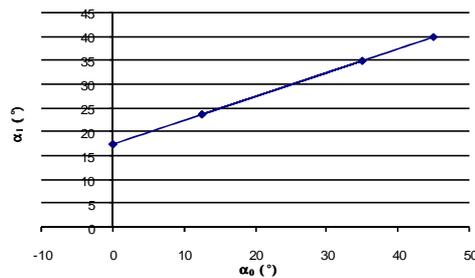


Figure 9 . *Solutions optimales sous contrainte d'espace de travail, avec singularité autorisée, et fonction objectif dextérité/compacité*

5.5. Synthèse et discussion

En dehors des deux solutions proches de celles déjà réalisées ou étudiées précédemment : Teresa ($\alpha_0 = 0^\circ, \alpha_1 = 17,5^\circ$) et Estele2 ($\alpha_0 = 45^\circ, \alpha_1 = 40^\circ$), Nouaille 2008, deux nouvelles structures intéressantes se font jour : une où la singularité est déplacée de la position centrale ($\alpha_0 = 12,5^\circ, \alpha_1 = 23,75^\circ$), et une, moins compacte cependant, où la singularité est rejetée hors de l'espace de travail obligatoire ($\alpha_0 = 35^\circ, \alpha_1 = 35^\circ$). Nous avons choisi de réaliser la première de ces deux solutions nouvelles, figure 7, et ce dans le cadre du projet ANR-ConInt2008 « Prosit » (Prosit website 2010). L'intégration mécatronique du prototype associé devrait être achevée prochainement, le robot fera l'objet d'une utilisation en secteur hospitalier.

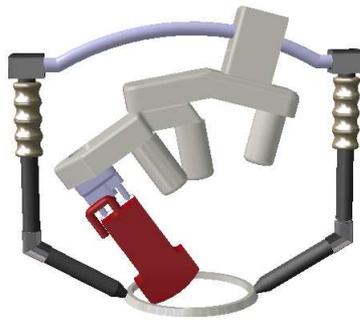


Figure 10 . Maquette CAO de Prosit1

6. Conclusion

Après avoir souligné l'intérêt d'un robot de télé-échographie et présenté les différents prototypes conçus au laboratoire Prisme, nous avons montré leur limite, liée à la singularité centrale du poignet sphérique. Nous proposons une configuration de poignet sphérique décalé permettant de déplacer la singularité centrale. Nous rappelons les modèles géométriques et cinématiques de cette structure afin de déterminer les indices de performances cinématiques du robot. Nous réalisons ensuite deux types d'optimisations par agrégation de deux

critères : un indice de performance cinématique et la compacité. Une dernière optimisation sous contraintes du cahier des charges donne le front de Pareto des solutions optimales. Le choix de la structure la plus compacte rejette la singularité centrale dans une zone de l'espace de travail moins gênante. Ce prototype sera réalisé dans le cadre du projet ANR Prosit.

Bibliographie

Al Bassit L., Structure mécanique à modules sphériques optimisées pour un robot médical de télé-échographie mobile, Ph.D. Orleans Univ., France , 2005.

Arbeille P, Ayoub J, Kieffer V, Combes B, Coitrieux A, Herve P, Garnier S, Leportz B, Lefbvre E, Poisson G, Vieyres P, Perrotin F. "Abdominal and fetal echography tele-operated in several medical centres sites, from an expert center, using a robotic arm & telephone or satellite link, *J Gravit Physiol.* 2007 Jul;14(1):P139-40.

Courreges F., Vieyres P., Poisson G., *Robotized Tele-echography, Teleradiology*, (Springer Verlag Eds.) S. Kumar, E.A. Krupinski, Chap 13. pp 139-153., ISBN 978-3-540-78870-6, 2008.

Courreges F., Novales C., Poisson G., Vieyres P., Modélisation, commande géométrique et utilisation d'un robot portable de télé-échographie: Teresa, *Journal Européen des Systèmes Automatisés, JESA* ISSN 12696935, [vol.43 no.1](#), pp. 165-196, 23 mars 2009.

ESA-Webpage

http://www.medes.fr/home_en/telemedicine/tele_consultation/artis.html

mai 2010.

Nouaille L., Smith-Guerin N., Poisson G., Modeling and Geometrical Validation of a Tele-Echography Robot, IEEE IROS, septembre 2008.

Nouaille L., Démarche de conception de robots médicaux. Application à un robot de télé-échographie Thèse de Doctorat, Université d'Orléans 9 décembre 2009.

Nouaille L., Smith-Guérin, N., Poisson G., "Optimization of a 4 dof tele-echography robot", Proc. of International Conference IROS, Taipei, 2010.

Prosit Website: <http://www.anr-prosit.fr/PROSITfr/Accueil.html>, mai 2010.

Gosselin C., Angeles J., A global Performance Index for the Kinematic Optimization of Robotic manipulators. ASME Journal of Mechanical Design, Vol.113, n° 3, pp. 220-226, 1991.

Yoshikawa T., Manipulability of Robotic Mechanisms. International Journal of Robotics Research, vol. 4 (2), 1985.



Pierre Vieyres a reçu un Master en génie électrique de l'University College London (Royaume-Uni), et un doctorat en 1990 en génie biomédical de l'Université de Tours (France). En 1992, il rejoint l'université d'Orléans (France), où il est actuellement professeur. Depuis 1995, il est impliqué dans le développement de robots pour le domaine médical et en particulier pour le télé-

échographie. Il a été le coordinateur du projet de l'OTELO projet européen (IST-2001 32512) et actuellement coordinateur de PROSIT, un projet ANR sur la télé-échographie robotisée. Ses activités sont axées sur le développement de systèmes haptiques et de l'architecture de contrôle bilatéral pour les robots télé-opérés.



Gérard POISSON est Professeur des Universités, en poste à l'IUT de Bourges, Université d'Orléans. Il est Directeur de cet IUT. Il est titulaire d'une Agrégation de mécanique et d'une thèse de Doctorat soutenue à l'Université d'Orléans. Il exerce ses activités de recherche au sein du Laboratoire PRISME de cette même Université dans l'axe thématique Robotique. Il a

été impliqué dans différents projets où il a notamment travaillé au

développement de capteurs et d'outils de perception de l'environnement pour la robotique manufacturière et la robotique mobile. Il est concerné par les aspects conception mécanique et mécatronique de robots téléopérés dédiés à des applications médicales, en particulier pour la télé-échographie.



Laurence Nouaille est Maître de conférences en 60^{ème} et 61^{ème} section en 2011 et directrice des Etudes du département Génie Mécanique et Productique de l'IUT de Bourges depuis juillet 2010. Elle est titulaire d'un Doctorat en Robotique depuis décembre 2009. Elle a obtenue un CAPET Génie Mécanique, option construction en 1995 et un DEA d'acoustique en 1994. Ses domaines d'enseignement sont la construction mécanique, la CAO (Catia, Proengineer, Inventor, Autocad), la mécanique, et l'hydraulique au département Génie Mécanique et Productique de l'IUT de Bourges depuis septembre 1995 et la mécanique et CAO (Inventor) au département QLIO (anciennement OGP) de l'IUT de Bourges de 1997 à 2007 puis de 2009 à 2011.



Natalie SMITH-GUERIN est Maître de Conférences à l'Université d'Orléans, France. Elle est titulaire d'une thèse de Doctorat, préparée à l'INSA de Lyon en 2000, en Sciences pour l'Ingénieur, spécialité robotique chirurgicale. Dans ce cadre elle s'est intéressée à l'opération de découpe de cornée robotisée par jet d'eau. Elle exerce ses activités de recherche au sein du pôle IRAUS du Laboratoire PRISME depuis 2001. Elle est principalement concernée par les aspects conception mécatronique d'un point de vue méthodologique et optimisation.

Caractérisation du frottement dans une large gamme de vitesse

Jean Jacques ARNOUX*, Guy SUTTER*, Gautier LIST*

** Université Paul Verlaine - IUT de Metz -*

Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (LEM3), UMR CNRS 7239,

Ile du Saulcy, 57045 Metz Cedex01

jjarnoux@univ-metz.fr; sutter@lpmm.univ-metz.fr ;

gautier.list@univ-metz.fr

RÉSUMÉ : *Le frottement est un phénomène présent dans la majorité des mécanismes. Il peut être exploité dans certaines applications telles que le freinage ou les procédés de mise en forme (laminage). Cependant, il est principalement défavorable en raison de la perte de rendement, de l'usure et de l'échauffement. Cette étude présente des moyens de caractériser le coefficient de frottement combinant grandes vitesses et fortes pressions dans une perspective d'optimisation. Pour proposer un large champ d'investigation, plusieurs dispositifs expérimentaux ont été développés. Un dispositif balistique permet d'obtenir des vitesses de glissement variant de 20 à 120 m/s tout en pilotant l'effort presseur. La mesure des efforts tangentiels conduit à la valeur du coefficient de frottement. Pour couvrir la gamme de vitesses plus faibles variant de 0,1 à 3 m/s, le capteur de mesure est adapté sur une machine de traction plus conventionnelle. Enfin, pour réunir les deux gammes de vitesses précédentes, un tribomètre de type pion disque monté sur un tour à commande numérique autorise des vitesses de glissement de 1 à 30 m/s. La correspondance des résultats obtenus sur chacun des dispositifs valide leur fiabilité et permet d'établir l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la pression et vitesse de glissement. Pour l'ensemble des essais, la pression de contact appliquée peut atteindre 200 MPa. Un couple acier/acier (C22) est sélectionné pour étudier l'interaction à l'échelle des aspérités caractérisée par des jonctions et/ou microsoudures.*

MOTS-CLÉS : *Frottement dynamique, Grande Vitesse, contact, expérimentation.*

1. Introduction

L'impact des phénomènes de frottement se mesure dans le domaine des systèmes mécaniques (engrenage, palier roulement...), de la biomécanique (prothèse, dentisterie...), de la mécanique des sols (glissement des glaciers...) ainsi que dans celui de la mise en forme des matériaux (laminage, emboutissage, extrusion, usinage ...). L'interaction entre surfaces des solides en mouvement est généralement représentée à l'aide du modèle de Coulomb, mettant en relation les actions qui s'exercent entre ces solides : la composante normale (contrainte normale ou pression surfacique p) qui les presse, et la composante tangentielle (contrainte de frottement τ_f) qui s'oppose au glissement :

$$\tau_f = \mu p \quad (1)$$

où μ est le coefficient de frottement de Coulomb. Celui-ci est souvent représenté par une constante dont la valeur dépend essentiellement de la nature des matériaux et de l'état des surfaces pour une température donnée. Cette relation n'est réellement efficace que pour les cas où les pressions de contact et les vitesses de glissement mises en jeu sont faibles. Dans le domaine des grandes vitesses et des grandes pressions, il faut tenir compte de nombreux autres paramètres pour obtenir des modèles acceptables tels que l'écrouissage, l'adoucissement thermique, l'effet de la vitesse de déformation et les températures localisées élevées. Une meilleure évaluation du coefficient de frottement, pour les grandes vitesses, est nécessaire pour dimensionner correctement les systèmes mécaniques [Kennedy_1984]. Par exemple, dans le domaine des chemins de fer, la loi de frottement de glissement permet de déterminer le couple maximal qui peut être transmis par une roue [Knothe_2001]. La modélisation des procédés de mise en forme demande également une attention toute particulière pour la prise en compte de la température qui joue un rôle essentiel sur la qualité des procédés et l'usure des outils. En usinage grande vitesse, la modélisation du frottement comme fonction de la vitesse de glissement et de la pression de contact permet de rendre compte de l'évolution des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe [Sutter_2005]. Une grande variété d'expériences est ainsi nécessaire pour caractériser complètement les phénomènes de frottement, dans lesquelles il convient de reproduire les conditions locales de grande pression et de vitesses élevées ainsi que les caractéristiques des surfaces des procédés étudiés. Ces conditions doivent être réalisées avec une géométrie simple pour laquelle la mesure des paramètres de contact peut être effectuée de façon aisée, rigoureuse et surtout reproductible. La

principale difficulté est de proposer un dispositif expérimental présentant à la fois les conditions de grandes vitesses et de grandes pressions. L'objectif principal étant d'étudier la dépendance du coefficient de frottement avec la vitesse, la pression et la température générée par le frottement lui-même.

Dans ce cadre, nous présentons trois dispositifs complémentaires de mesure de frottement dynamique développés au laboratoire LEM3 de Metz qui permettent de balayer une très large gamme de vitesse de glissement (de 0,1 m/s à 120 m/s) avec des pressions de contact supérieures à 200 MPa : -1- un dispositif pion/disque monté sur tour à commande numérique -2- un système de frottement monté sur machine hydraulique rapide et -3- des expériences de frottement effectuées à l'aide d'un dispositif balistique (lanceur à gaz). La problématique liée à la conception de ce type d'essais est présentée et les principaux résultats sur la mesure du coefficient de frottement dynamiques sont discutés.

2. Dispositifs expérimentaux

L'originalité de cette étude réside dans le travail de développement d'un capteur de mesure d'efforts générés lors du frottement combinant la grande vitesse et la forte pression de contact. Ce capteur spécifique de force est intégré sur un banc balistique capable d'atteindre des vitesses de glissement supérieures à 120 m/s. Afin de proposer une étude complète de l'évolution du coefficient de frottement avec la vitesse, deux dispositifs complémentaires seront adjoints au banc balistique : tout d'abord, une machine de traction hydraulique dynamique capable de recevoir le capteur, puis un dispositif plus conventionnel de type pion-disque qui complétera la gamme des mesures.

L'utilisation de différents appareillages expérimentaux offre d'une part la possibilité d'explorer une large gamme de vitesses de glissement mais surtout de valider les mesures effectuées par l'utilisation de différentes chaînes d'acquisition par chevauchement des résultats.

Le **dispositif balistique**, présenté Fig. 1, se compose d'un canon relié à un tube de lancement coaxial à un tube de réception qui débouche sur un amortisseur. Cet équipement a été initialement développé pour l'étude de la coupe en conditions extrêmes [Sutter_2005] se libérant des

contraintes induites par les machines industrielles. La détente d'une réserve d'air comprimée stockée dans un canon, propulse un projectile à grande vitesse dans le tube lanceur. Une longueur suffisante de ce tube, combinée à une masse de projectile ajustée (différentes géométries, différents matériaux) en fonction des paramètres d'essais, assure une vitesse quasi-constante au projectile à son arrivée à l'extrémité du tube de lancement. Un ensemble de trois capteurs lumineux enregistre précisément la vitesse et contrôle l'accélération du projectile. L'énergie cinétique du projectile disponible pour le processus d'interaction est définie pour limiter la variation de vitesse à 4%.

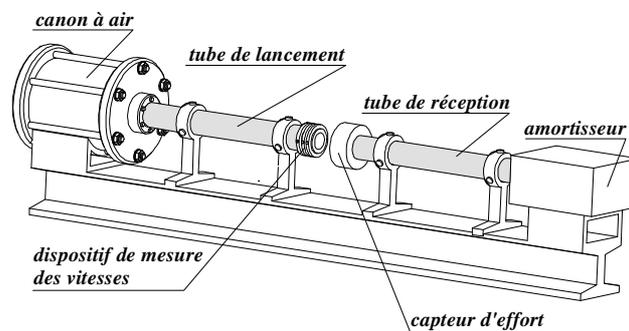


Fig. 1 Dispositif balistique

Le capteur de force, supporté par le tube de réception, supporte l'éprouvette et lui impose une pression surfacique par l'intermédiaire d'un anneau dynamométrique et de deux plaquettes (cf. Fig. 4). La mise en translation de l'éprouvette est provoquée par l'impact du projectile. L'ensemble éprouvette projectile est réceptionné ensuite dans un amortisseur. L'analyse post-mortem des faciès frottés est alors possible. Le principe d'enregistrement de l'effort généré par le frottement de l'éprouvette et des plaquettes sera présenté au paragraphe suivant.

Le design du capteur de force permet facilement son implantation sur une **machine de traction conventionnelle**. Ce montage, présenté schématiquement Fig. 2, permet d'explorer la gamme basse des vitesses de frottement ($0.1 \text{ m/s} < V < 3 \text{ m/s}$). La vitesse de translation est assurée par un vérin hydraulique qui, similairement au projectile présenté précédemment, pousse l'éprouvette entre les plaquettes. La mesure des efforts par le capteur sera complétée par l'enregistrement issu de la cellule de charge de la machine de traction.

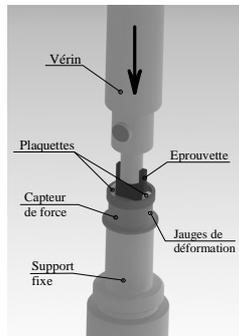


Fig. 2 Capteur de force installé sur une machine de traction.

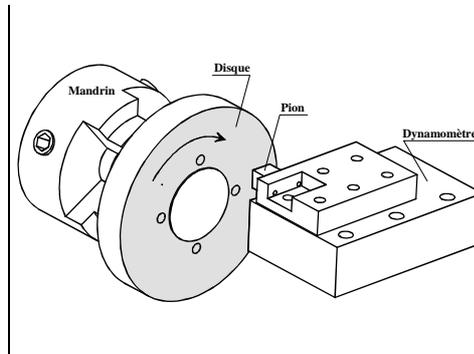


Fig. 3 Dispositif de frottement de type pion-disque adapté sur un tour à commande numérique.

De conception volontairement différente, afin de valider les résultats issus des montages précédents, le troisième dispositif d'analyse du frottement, de type **pion-disque**, est réalisé sur un tour à commande numérique (cf. Fig. 3). Le mandrin assure la mise en rotation de l'éprouvette (Disque) alors que la plaquette (Pion) est liée à la tourelle porte-outil. La mesure des efforts est assurée par une table dynamométrique de type Kistler positionnée entre le support du pion et la tourelle.

L'ensemble des essais présentés dans cette étude, concerne le frottement sec d'un acier mi-dur de type C22 sur lui-même. Il est à souligner que la conception de ces appareillages permet une adaptation simple à l'étude d'autres couples de matériaux. D'autre part pour mieux comprendre les phénomènes présents lors du frottement les faciès des échantillons sont analysés par interférométrie à lumière blanche. Ces observations permettent de suivre l'évolution de la rugosité mais aussi de révéler les éventuels arrachements de matière provoqués lors de micro-jonctions.

3. Conception du capteur de mesure d'effort

Le capteur d'effort présenté Fig. 4 est composé d'un anneau dynamométrique destiné à appliquer l'effort normal F_N et d'un support équipé de jauges de déformation collées de manière symétrique. L'éprouvette, positionnée initialement dans le capteur de mesure, est contrainte par deux plaquettes qui la compriment sur ses faces latérales. Les déformations engendrées par l'impact puis par le frottement des pièces, sont traduites en efforts tangentiels de frottement F_T grâce à un étalonnage précis du capteur d'effort. Il importe de bien maîtriser les relations qui lient la déformation du capteur à l'effort qui lui est imposé. C'est pourquoi, une modélisation aux éléments finis (Catia) de l'anneau (Fig.4) et du capteur complètera l'étalonnage.

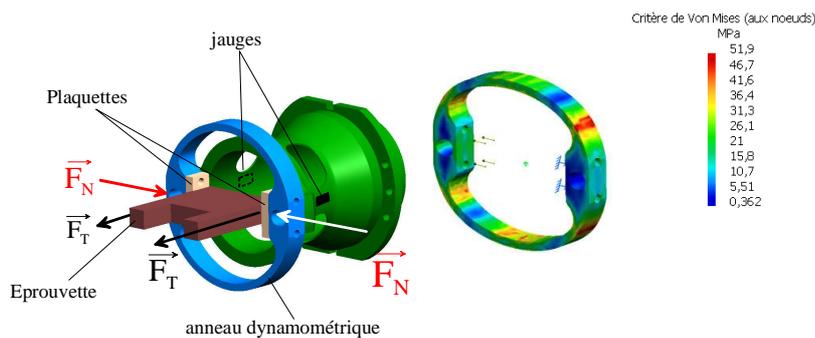


Fig. 4 Capteur d'effort monté avec l'éprouvette et les plaquettes.
 Détail des contraintes induites sur l'anneau dynamométrique.

3.1. Optimisation du capteur en fréquence

Pour une vitesse de frottement donnée, le capteur réagit théoriquement comme un système oscillant à un degré de liberté. Dans le domaine élastique, le dispositif présente un comportement similaire à un ressort en compression. Le signal enregistré par les jauges révèle plusieurs modes vibratoires. L'objectif étant de parfaitement identifier les différents modes propres du système et les fréquences induites par le

phénomène de frottement. Un traitement efficace du signal issu des jauges sera alors possible. Les fréquences propres du capteur augmentent avec la raideur du système et diminuent lorsque l'inertie augmente. L'augmentation des fréquences peut être conséquente à l'utilisation d'un matériau à module d'Young plus élevé. A l'inverse, l'augmentation de la masse et donc de l'inertie du capteur diminue ces fréquences. Rappelons l'expression de la fréquence propre f d'un système vibratoire à un degré de liberté:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad \text{avec } K \text{ la raideur et } M \text{ la masse} \quad (2)$$

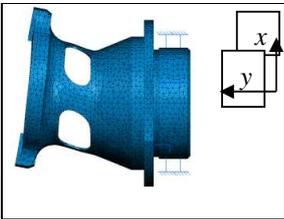
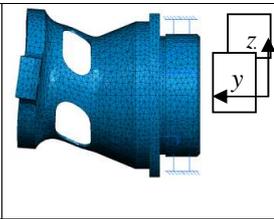
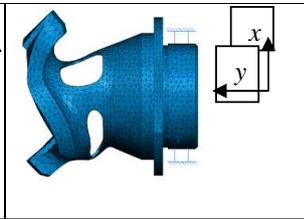
La caractérisation des modes propres de vibration d'une géométrie peut se faire de plusieurs manières. L'outil numérique permet rapidement d'extraire ses fréquences propres (Fig. 5). Le pot vibrant et le marteau d'impact caractérisent physiquement ces fréquences.

Etude de réponse en fréquence du capteur de mesure sous CATIA V5

Masse totale : 791 gr Nombre de nœuds : 7967

Nombre d'éléments : 28745

Matériau: C22 E= 200000 MPa Re = 300 MPa $\nu = 0,266$

		
Mode 1: 2169 Hz	Mode 2: 2273 Hz	Mode 10: 9884 Hz
dépl. radial suivant l'axe x	dépl. radial suivant l'axe z	Rotations suivant l'axe z

Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6	Mode 7	Mode 8	Mode 9
2889 Hz	3341 Hz	4463 Hz	4705 Hz	4860 Hz	8738 Hz	9306 Hz

Fig. 5 Modes propres de vibration du capteur de force.

3.2. Traitement du signal

L'analyse en fréquence du signal obtenu par les jauges pour ce capteur souligne la présence d'une gamme étendue de fréquences (de quelques Hertz à plus de 10 kHz) Ces fréquences correspondent pour une part importante à celles calculées précédemment. Il est à noter que les fréquences propres du capteur se superposent au signal. En imposant au signal un filtre, ajusté aux valeurs calculées pour le capteur et portant sur les fréquences comprises entre 2.2 kHz et 10 kHz, les effets de résonance du capteur à l'impact sont réduits, mettant en évidence les efforts produits par le frottement (Fig. 6) présentant des fréquences plus faibles.

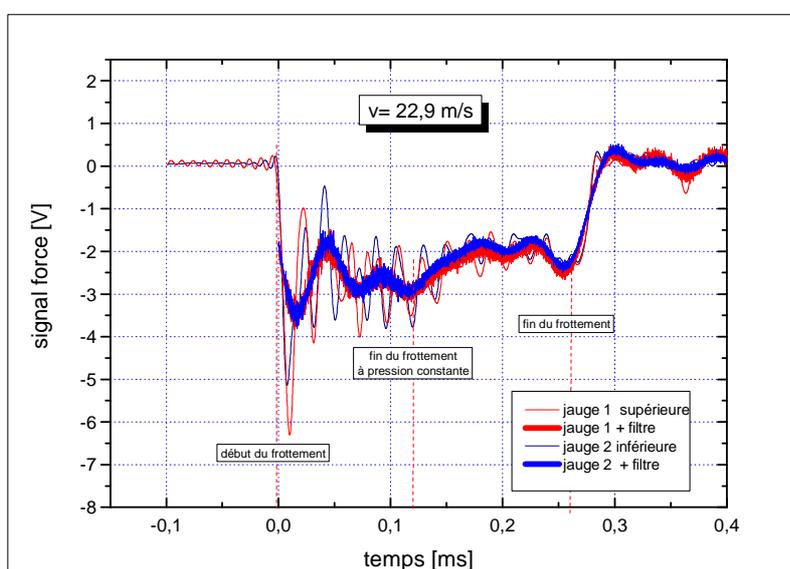


Fig. 6 Signaux bruts et filtrés des jauges enregistrés lors du frottement acier/acier.

Seule la partie du signal correspondant à une pression de contact constante (rigidité constante de l'éprouvette) est prise en compte pour évaluer le coefficient de frottement.

Sur la machine hydraulique, les vitesses plus faibles explorées fournissent un signal moins perturbé en hautes fréquences ce qui autorise une lecture directe de l'effort moyen. Enfin, le système pion-disque permet de joindre les plages de vitesses de ces deux dispositifs.

4. Résultats

Une analyse des surfaces des corps frottants peut être effectuée à l'aide de la microscopie à lumière blanche. Cette analyse permet de reconstituer les profils des surfaces en 3D facilitant l'interprétation des phénomènes se produisant au niveau des aspérités. Les résultats expérimentaux montrent qu'après un essai de frottement la rugosité des deux surfaces est sévèrement altérée. La figure 7(a) montre l'état de surface typique d'une éprouvette avant frottement et la figure 7(b) après l'essai de frottement obtenu sur le dispositif balistique. La réponse des matériaux soumis à la forte pression est un écoulement plastique des aspérités ainsi qu'un écrêtage au niveau des sommets. La rugosité de surface passe d'une valeur $Ra = 1.47 \mu\text{m}$ à $3 \mu\text{m}$ suite à des arrachements de matière. Le processus de déformation lié aux grandes températures (température flash) générées par le frottement conduit à la formation de connectivités entre les aspérités des deux solides [Balakin_1981]. Les grandes vitesses de glissement accélèrent le phénomène d'altération des aspérités et d'étalement de matière faisant apparaître localement la constitution d'une couche limite ou d'un troisième corps [Stempfle_2006]. La complexité des phénomènes thermomécaniques mis en jeu fait que la valeur du coefficient de frottement n'est pas constante au cours du temps (phénomènes d'usure) et dépend fortement des conditions d'essai (pression, vitesse de glissement, état de surface, nature des matériaux, température...).

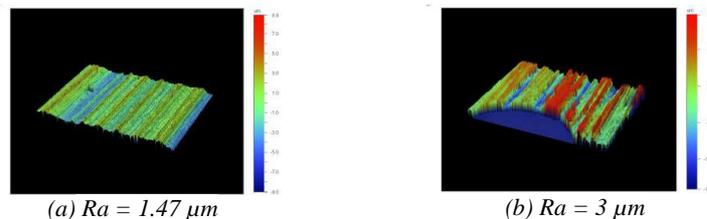


Fig. 7 Observations par interférométries du faciès frotté; $P = 200 \text{ MPa}$;
 $V = 23 \text{ m/s}$

La Figure 8 montre l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement pour deux pressions de contact ($P = 40$ et 200 MPa). Une telle courbe est réalisée grâce à la complémentarité des trois dispositifs et permet de montrer l'évolution pour des vitesses allant des faibles vitesses ($0,1 \text{ m/s}$) aux très grandes vitesses (70 m/s). Plusieurs domaines apparaissent très clairement.

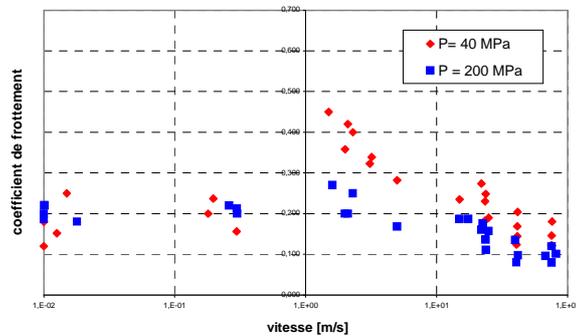


Fig. 8 Evolution du coefficient de frottement pour un frottement sec acier-acier

Entre 0,1m/s et 1 m/s le coefficient de frottement est une fonction croissante de la vitesse. Ce domaine est caractérisé par la prédominance des phénomènes mécaniques au niveau des jonctions des aspérités. Au-delà de 1 m/s une diminution prononcée du coefficient de frottement est observée. Dans ce domaine de vitesses, l'effet de la température sur le comportement mécanique des matériaux est prédominant et l'effet de l'adoucissement thermique agit sur la contrainte tangentielle faisant chuter progressivement l'effort nécessaire pour cisailer les aspérités. Une évolution similaire avait déjà été observée [Lim_1989]. A partir de 30 m/s, une plus faible variation du frottement est observée. L'effet de la température est en compétition avec l'effet du comportement visqueux du matériau (augmentation de la contrainte avec la vitesse de déformation). En fonction de la pression appliquée, le coefficient de frottement peut continuer à diminuer (très forte pression) ou légèrement augmenter (plus faible pression).

5. Conclusion

L'analyse fine du processus de frottement impose de disposer de données expérimentales précises et implique donc de maîtriser parfaitement la mise en œuvre des essais de caractérisation. Dans cette optique, un ensemble de trois dispositifs complémentaires en vitesse a été élaboré permettant d'atteindre plus de 120 m/s. La convergence des

résultats obtenus sur ces différents équipements fiabilise les données expérimentales. En l'absence de phase de rodage (passage unique), l'interaction à grande vitesse tend à altérer l'état de surface par arrachement des connectivités entre aspérités. D'autre part, une variation limitée du coefficient de frottement est observée à faible vitesse, ainsi qu'une faible influence de la pression de contact. Une forte augmentation de ce coefficient est cependant notée en s'approchant de 1 m/s. Au-delà de cette vitesse, l'effet de la température semble être prédominant en provoquant suite à un adoucissement thermique, une chute du coefficient de frottement. Dans ce domaine de vitesse, l'augmentation de la pression tend globalement à réduire les effets du frottement.

Bibliographie

Kennedy F. E. Jr, « Thermal and thermomechanical effects in dry sliding », *Wear*, vol. 100, 1984 p. 453-476.

Knothe K., Wille R., and Zastra B.W., « Advanced contact mechanics road and rail », *Vehicle Systems Dynamics*, vol. 35, Nos. 4.5, 2001, p. 361.

Sutter G., Molinari A., « Analysis of the cutting force components and friction in high speed machining. », *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*. vol. 127, 2005, p. 245-250.

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.

Balakin V. A., « Heat flow distribution and combined heat-mass processes at the contact interface of a friction pair », *Journal of Engineering Physics*, vol. 40, p. 660-665, 1981.

Stempfle P., Von Stebut J., « Nano-mechanical behaviour of the 3rd body generated in dry friction : Feedback effect of the 3rd body and influence of the surrounding environment on the tribology of graphite », *Wear*, vol. 260, p. 601-614, 2006.

Lim S.C., Ashby M.F., Brunton J.H. «The effects of sliding conditions on the dry friction of metals. », *Acta metallurgica*, vol. 37 n°3, 1989, p. 767-772.



Guy Sutter est professeur à l'IUT de Metz et conduit ses recherches au laboratoire d'étude des microstructures et de mécanique des matériaux (LEM3) de l'Université Paul Verlaine – Metz. Ses thématiques de recherche s'articulent principalement 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 et les mesures thermiques.



Gautier 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'usure des outils de coupe, du frottement dynamique et du comportement mécanique des matériaux sous sollicitations extrêmes.



Jean-Jacques Arnoux est enseignant en mécanique à l'IUT de Metz. Il est également doctorant en deuxième année et développe son travail de thèse au sein du LEM3 de l'Université Paul Verlaine – Metz. Son sujet porte sur l'analyse du phénomène de frottement entre TA6V et Ta et sur la caractérisation des surfaces ayant subi un frottement sec à grande vitesse et sous de fortes pressions. Cette caractérisation est réalisée grâce à la spectroscopie Raman et à la microscopie électronique à transmission (MET).

***Quartiers dits sensibles et transactions individus-
environnements: vers le Sentiment d'Injustice Subie***

Azeddine Goutas*
Nasrédine Goutas**

**Laboratoire LASA
EA 3189
Faculté des Lettres et Sciences Humaines
Université de Franche-Comté
30-32, rue Mégevand
25030 Besançon Cedex
France*

***Laboratoire ESO Angers
UMR CNRS 6590
Université d'Angers
5 bis, Bd Lavoisier
49045 Angers Cedex
FRANCE*

azedinegoutas@hotmail.com; nasredine.goutas@univ-angers.fr

RÉSUMÉ : *La compréhension d'une quelconque problématique nécessite de plus en plus des regards croisés de diverses disciplines. Dans ce prolongement, la sociologie et la psychologie sociale peuvent contribuer, dans une perspective transdisciplinaire, à une meilleure appréciation des phénomènes de violence stigmatisant les quartiers dits sensibles. Des intuitions nées d'expériences professionnelles dans certains de ces quartiers, nous avons effectué une enquête par observations directes et récits de vie dans un petit quartier dit sensible de l'Est de la France. Le point de départ était surtout d'analyser le fonctionnement des services, des équipements. L'environnement physique impose-t-il, plus qu'ailleurs, un mode de penser et d'agir ? Les individus ont-ils des marges de manœuvre pour échapper à la pression de la structure ? La recherche de l'efficacité de l'action dans un système économique basé sur la rentabilité conduit les professionnels en travail social etc. à réorganiser leur travail, le fonctionnement de l'offre de services. Dans cette nouvelle forme de transaction individus-*

équipements, un catalyseur comportemental fondamental se dégage, tant des observations que des récits de vie informels : le Sentiment d'Injustice Subie (SIS). Les principaux résultats contribuent à une meilleure compréhension des interactions entre des publics en difficultés et des territoires « vides ».

MOTS CLÉS : *sentiment d'injustice subie, violence, affects, transaction, environnements et territoires*

Introduction

Le quartier dit sensible selon une perspective de transactions individu-environnement

Si l'être humain, comme toute autre espèce vivante a besoin d'un certain milieu pour vivre et se développer, il est la seule espèce dont l'activité a une influence majeure sur son milieu de vie et celui des autres. La ville est devenue le milieu de vie d'environ 50% de la population humaine mondiale et tend à s'élargir chaque année dans certains pays. Il faut tenter alors de décrire et comprendre l'environnement de vie humaine. Il est difficile à décrire car c'est une problématique récente. Trois grands types de structures se dégagent : les lieux d'habitation, les lieux de travail, les lieux de divertissement. L'explosion de la population rend ces questions cruciales. La hausse de la population est souvent considérée en terme économique et problèmes à venir d'eau, de réserve de nourriture, de pollution et de territoire à tel point que l'on oublie de prendre en considération l'impact direct et premier sur les comportements humains. Il s'agit alors de considérer l'importance des transactions de l'individu face à son environnement et l'environnement face aux individus. La présence de structures, d'équipements est nécessaire pour socialiser les affects sociaux et contribuer au contrôle de la violence, de la santé etc. Il est surprenant de constater la fuite progressive des structures dans la majorité des quartiers dits sensibles (fuite réelle et/ou symbolique).

L'École de Chicago ou courant de l'écologie urbaine ou écologie humaine s'est intéressée à ces problématiques. Ce courant se caractérise justement par l'engagement sur des études empiriques à la fois par le

recours à des méthodes principalement qualitatives et secondairement des méthodes quantitatives. Elle est à la base de l'interactionnisme symbolique. C'est Albion W. Small en 1892 qui fonda le département de sociologie à l'université de Chicago. Mais les véritables représentants de l'École de Chicago sont Thomas et Park. Les premières recherches en sociologie urbaine de l'École de Chicago ont été inspirées par les travaux des étudiants en travail social en lien avec les problèmes sociaux de l'époque. Nous avons tendance à l'oublié : les interactionnistes (e.g. Cooley, Dewey, Mead, Thomas, Znaniecki, Burges) et les travailleurs sociaux étaient partenaires. Par exemple, Mead a produit plus de quatre vingt articles durant sa vie. Beaucoup traitent de sujets répondant aux préoccupations des travailleurs sociaux : la sympathie, le système éducatif, la guerre et la paix, l'absentéisme et les sanctions, la résolution de problèmes, la gestion des tensions au travail, les inégalités économiques, les droits de l'homme, les relations internationales, la philanthropie. L'interactionnisme en tant que théorie de la transaction sociale aidait les hommes et les femmes de terrain à comprendre, par exemple, les relations des individus à leur environnement physique et/ou social, des interprétations culturelles différentes d'une expérience similaire, à explorer les significations sur lesquelles fonctionnent les groupes, à prêter attention à la dimension sociale des affects et plus particulièrement aux émotions explosives. Les recherches empiriques avaient pour objectifs de tenter de comprendre les relations entre des acteurs particuliers dans des lieux et des moments circonscrits. C'est à partir d'une réalité territoriale que l'École sociologique de Chicago essaie d'interpréter les modes de vie qui sont, en partie, produit par un territoire qui a des caractéristiques originales qui sont mal connues. Par ailleurs, précisons que l'interactionnisme symbolique est surtout la marque exceptionnelle de la psychologie sociale américaine. Quelles sont les fonctions du sol, de la relation entre le social et le spatial ? Quelle est l'influence exercée par le territoire sur les comportements ? Une sociologie ou psychologie sociale du territoire est-elle suffisante dans l'explication des comportements ?

La fonction des structures : l'environnement contrôle t-il l'individu ?

La sociologue américaine Smith-Lovin (1979) peut aider à répondre à ces questions. Elle reprend des études réalisées par le psychosociologue Barker et ses associés (Barker, 1960, 1963, 1968; Barker et Wright, 1955; Barker et al. 1961). En effet, ces derniers, selon

la sociologue, ont développé un concept très intéressant, celui de « behavior setting ». Barker définit les behavior settings (B.S.) comme des unités stables, extra-individuelles et qui exercent un grand pouvoir disciplinaire, de contrôle, coercitif sur les comportements dès que les individus se trouvent à l'intérieur, sous l'emprise de ces sites. Autrement dit, il s'agit des structures. Barker privilégiait l'effet de l'environnement physique sur les comportements. C'est dans les années 1970 qu'il y a un regain d'intérêt pour l'étude des relations entre environnement, structures et comportements (Smith-Lovin, 1979). Par exemple, selon Smith-Lovin, percevoir, catégoriser un espace, un quartier, comme une prison conduit à associer les individus qui sont dans ce lieu à des personnages identifiés par l'endroit : des responsables, des prisonniers, des visiteurs, ou des surveillants. Par conséquent, se retrouver dans un endroit avec une réputation négative va entraîner un jugement social négatif des personnes fréquentant ou vivant dans ce lieu. Au contraire, ceux qui vivent ou interagissent avec un environnement, une structure perçue comme positive et familière peuvent favoriser, véhiculer cet avantage auprès des autres pour se valoriser.

La signification affective du lieu, de la structure a un impact certain sur le comportement. C'est ce que l'on pourrait nommer une transaction affective individu-environnement. Par exemple, dans les quartiers de notre étude, certains interviewés nous ont rapporté que des institutions pénales (e.g., tribunal) ou des processus telle la discrimination au travail, les obligeaient à demeurer dans un endroit désagréable à l'image du prisonnier. Les comportements et les discours de revendication ou de réclamation sont sanctionnés directement ou indirectement. La structure acquière alors cette forme de transaction négative. Les tentatives de réponses à nos questions ci-dessus nous amènent à poser le problème de la manière suivante : la sociologie ou psychologie écologique doit s'intéresser à la transaction triangulaire : individu-structure-action.

Vers l'émergence du sentiment d'injustice subie dans la transaction

L'étude des Behavior Settings ou structures nécessite le recours à des concepts. Cela permet, au-delà des caractéristiques physiques définissant un espace, de comprendre le type de relation, de transaction (Blanc, 2009; Giboux, 2009) qu'une personne vit à l'intérieur d'un environnement donné. Autrement dit, comment la relation à la structure

est-elle vécue ? Cette question nous rappelle que tout environnement est social dans sa configuration et son aménagement physique même car tout espace est un objet produit socialement. Notre relation à l'environnement est par conséquent toujours sociale. L'environnement physique n'est pas suffisant pour expliquer les comportements, il faut tenir compte d'autres facteurs interdépendants avec l'environnement. De nos entretiens informels, les habitants mettaient en avant la notion de justice et d'injustice. Ce sentiment émergeait principalement de la notion de comparaison. De ce constat, il nous semble pertinent de mettre en avant, deux concepts fondamentaux de la sociologie et de la psychologie sociale : celui de comparaison sociale (e.g., Cooley, 1902; Festinger, 1954) et celui de justice (e.g., Dubet, 2006; Moore, 1964; Walster, Walster et Bersheid, 1978; Goutas et Goutas, 2008 ; Goutas, Goutas et Vieille-Marchiset, 2010) qui en découle.

En effet, en premier lieu, les sociétés humaines ont toujours été soucieuses de la question de justice et d'injustice. Dans les prochaines années cette question sera encore davantage prégnante du fait de la diminution des ressources sur notre planète et de l'impossibilité de satisfaire les besoins de toutes les populations.

Objectifs de la recherche

L'enquête s'inspire de la théorie et de la méthodologie des *behavior settings* conçues par Barker (1968, 1963, 1955), dénommée théorie de l'*assise sociospatiale du comportement* ou théorie des *Sites Comportementaux*. La question essentielle est d'étudier l'influence de l'environnement physique, plus précisément des équipements sur les comportements. Goffman (1973 a, b), dans son étude sur les relations en public, explique que les individus se comportent différemment selon le lieu et selon les personnes auxquelles ils sont confrontés. Selon Goffman, la prise en compte de la dimension environnementale physique et sociale est cruciale pour comprendre les perceptions, les attitudes et les comportements humains. *S'inspirer* de la méthode des *behavior settings* ne veut pas dire reproduire intégralement. Nous en conservons la notion de transaction et l'approche quantitative, mais par souci de simplification et de réduction des coûts, nous diminuons le nombre de propriétés décrites. A ceci nous ajoutons une enquête d'opinion auprès des habitants sur la perception de ces équipements de proximité. En effet, les individus

peuvent évaluer positivement ou négativement leur environnement physique. Ces processus psychiques ne peuvent être détachés des aspects environnementaux car les influences réciproques sur les comportements sont fondamentales. Malgré les extraordinaires descriptions détaillées de Barker et Wright, des questions demeurent peu approfondies ou même inexploitées : comment les individus interprètent les sites (structures/équipements) et comment ces sites vont-ils générer des comportements acceptables ou pas ?

Le but de notre recherche sera d'une part de tester la mise en application de ces différents concepts, d'autre part la simplification de la théorie des Behavior Settings à travers l'étude de la nature, l'usage et la perception des « ressources écologiques » dans un petit quartier dit sensible. L'étude vise à décrypter les comportements par le biais d'observations menées *in situ*, à la manière d'ethnologues, en vue de relever la nature des forces qui s'exercent sur l'individu.

Notre hypothèse consiste à soutenir que le fonctionnement des structures s'inscrit dans un décalage entre offre de services et besoins des usagers dans le quartier dit sensible. Il en découle un sentiment d'injustice subie. Les indicateurs sont essentiellement l'analyse des fréquentations, des emplois occupés par les habitants du quartier, les heures d'ouvertures, les offres de services disponibles etc.

Méthode

But de l'enquête éco-comportementale en quartier dit sensible :

- a)** Décrire et dénombrer les ressources écologiques ou équipements (commerces, services, établissements de santé, écoles, administrations etc...) qui sont implantées sur une zone déterminée, en l'occurrence le quartier,
- b)** Quantifier l'usage qui est fait de ces ressources par les habitants de cette zone aussi bien que par les autres. Concrètement, l'enquête vise à décrire et à quantifier :

* *Le volume des ressources* elles-mêmes, telles qu'elles se présentent objectivement, c'est-à-dire, occurrences, durée, personnel, pendant la durée de l'observation,

* *Le volume des fréquentations*, c'est-à-dire, le nombre de clients ou usagers, (leur catégorie sociale, leur âge, leur origine locale ou non, leur origine culturelle)

* *Les formes d'actions* offertes à la population.

Déroulement

Description de la zone étudiée

Le quartier social que nous nommerons QS1 est l'un des plus petits d'une ville de l'Est de la France. Avec ses 2121 habitants, il convient parfaitement à une sociologie descriptive. Sa construction est datée entre 1966 et 1969. Il se trouve à environ 15 minutes en bus et 25 minutes à pieds du centre ville. L'environnement partiellement boisé, en lisière d'une forêt, il offre un cadre paisible. Le quartier semble cependant coupé en deux : d'un coté, une zone pavillonnaire dominante et de l'autre des bâtiments H.L.M. Au moment de l'observation, un programme de rénovation urbaine débutait ayant pour titre « *la requalification du patrimoine et le renouvellement urbain* ». Il s'agissait de la démolition de 320 logements sociaux, la réalisation et l'amélioration des équipements publics. 56 logements construits dans les années 60 ont déjà été démolis pour faire place vers fin 2010 à 1 pavillon, 20 logements en collectifs (locatif privé) et 25 logements publics (HLM). Par ailleurs une place centrale et commerciale est prévue pour donner un cœur au quartier qui actuellement est inexistant. Selon l'architecte responsable de ce projet, l'objectif de la politique de la ville se résume à « *différentes catégories de populations sur un même territoire* ».

Circonscription du secteur d'observation

Notre population d'étude était constituée de 56 usagers des services offerts et 37 membres du personnel des structures sur le quartier (N = 93). L'observation s'est déroulée en 2007. Selon les principes de Barker, nous avons délimité notre site d'observation au secteur circonscrit par différentes rues. Lors de notre exploration du quartier, un

peu plus d'une 20 de structures a été recensée : une école maternelle, une crèche, une école primaire, un collège, une bibliothèque, un bureau pour permanence d'éducateurs spécialisés, une MJC (Maison des Jeunes et de la Culture), un point public de la ville avec diverses permanences dans les mêmes locaux : une permanence de la CRAM (service social), d'un délégué du procureur, de la mission locale, d'une association d'aide aux victimes d'infractions, d'un écrivain public; un centre communal d'action sociale (espace solidarité), un office H.L.M., un restaurant kebab-bar-tabac-pmu, un boulanger-pâtissier, un boucher-traiteur, une école d'équitation, un complexe sportif, une église, un cabinet médical, une pharmacie. Seuls 12 B.S. ou équipements ont fait l'objet de notre enquête. En effet, l'observation nécessite des autorisations et des RDV. On ne peut pas observer à souhait, l'observation et les entretiens sont limités dans le temps car les professionnels sont dérangés : crèche, médecin, école..., d'autres ne sont pas observables facilement : médecin en consultation...

Description des unités d'observation

(a) Heures personnels, heures usagers et rapport entre elles

* *la ressource* elle-même, telle qu'elle se présente objectivement, c'est-à-dire, occurrences, durée, personnel, (les formes d'action seront étudiées par la suite), pendant la durée de l'observation,

* *la fréquentation*, c'est-à-dire le nombre de clients ou usagers, (leur catégorie sociale, leur âge, leur origine locale ou non, leur origine ethnique etc...seront étudiées par la suite),

Durée = nombre d'occurrences (nombre de fois où l'établissement est ouvert pendant la période) x durée de chaque occurrence

Dans le volet *ressource*, on calculera le *volume ressource*, égal au produit de la durée par le nombre de personnes travaillant régulièrement :

$$V_r = d \times p \quad \text{où } d = \text{durée et } p = \text{effectif du personnel}$$

De la même manière on calculera le *volume fréquentation* :

$$V_f = d \times c \quad \text{où } d = \text{durée et } c = \text{nombre de clients}$$

Exemples : une école ouverte 35 heures par semaine, qui a 10 enseignants et 100 élèves aura un V_r hebdomadaire $= (10 \times 35) = 350$ et un $V_f = (100 \times 35) = 3500$

Son volume total V_t , $(V_r + V_f)$, sera égal à 3850. Ce volume indique quantitativement sa *masse d'action*. Cette masse d'action est élevée, dans le cas présent, car on estime que les enseignants et les élèves sont actifs constamment pendant la durée

Pour calculer les volumes, ressource, fréquentation et total d'une boutique ouverte 35 heures pendant la semaine, qui emploie 2 personnes à temps plein et qui a 30 clients, il est facile de calculer V_r (70), par contre, on ne peut faire le même raisonnement pour V_f , car on ne peut dire que les 30 clients soient restés pendant toute la durée, il faut donc recourir à une estimation de la durée de présence moyenne de chaque client.

Estimons cette durée moyenne à 30 minutes. $V_f = (30 \times 0,5) = 15$

La masse $V_t = (70 + 15) = 85$.

Deux sortes d'établissements se dégagent, ceux pour lesquels la fréquentation est égale ou supérieure aux ressources et ceux pour lesquels la fréquentation est inférieure aux ressources. Pour distinguer les deux il suffit de calculer le rapport V_f/V_r . Si celui-ci est compris entre 0 et 1, le volume ressource est supérieur au volume fréquentation. Cela signifie inégalité entre temps offert par le service et temps utilisé par les usagers. En effet, le temps proposé par l'établissement est plus élevé que le temps utilisé par les usagers. L'établissement fait agir des personnes plus que le nécessaire. Si le rapport V_f/V_r est égal à 1, cela signifie qu'il y a égalité entre V_f et V_r : le système est alors en équilibre. Si le rapport est supérieur à 1, V_f est supérieur à V_r : le temps utilisé par les usagers est supérieur au temps proposé par le service. Pour l'école nous avons $3500/350 = 10$ alors que pour la boutique, nous avons $15/30 = 0.5$

La masse exprime *l'importance de l'activité de l'établissement* de la zone. Si l'école ferme elle supprime 3850 unités. Si la boutique ferme elle supprime 85 unités.

Le rapport V_f/V_r exprime son *efficacité praxéologique*, efficacité qui résulte à la fois du nombre de personnes employées (cadres et personnel) et de la réponse qui est apportée par le corps social.

(b) Formes d'action

Les formes d'action se résument à travers un verbe prototypique principal :

Esthétique intérieure et extérieure (verbe prototypique : **décorer**), esthétique personnelle (verbe prototypique : **séduire**), affaires (verbe prototypique : **posséder**), justice (verbe prototypique : **juger**), éducation (verbe prototypique : **apprendre**), administration (verbe prototypique : **manifeste sa citoyenneté**), sécurité (verbe prototypique : **se rassurer**), alimentation (verbe prévalent : **se restaurer**), santé (verbe prototypique : **se soigner**), loisirs (verbe prototypique : **se divertir**), religion (verbe prototypique : **rendre un culte**), communication et solidarité (verbe prototypique : **communiquer**), information (verbe prototypique : **s'informer**), réparation (verbe prototypique : **réparer**), production (verbe prototypique : **produire**) etc.

Résultats

Les données ont été recueillies au moyen de l'observation directe, du questionnaire et du récit de vie. Elles portaient sur le fonctionnement de l'établissement sur une période d'une semaine durant le mois de mai 2007. En plus de l'observation, nous avons un questionnaire permettant de répondre aux questions :

(a) Comment les habitants perçoivent l'équilibre de leurs relations avec l'administration municipale, selon divers points de vue : équipements et réseaux techniques, transports, population, qualité de la vie etc... ?

(b) Comment se fait la comparaison par les résidents de la zone étudiée avec d'autres zones ?

Signalons d'emblée que nous n'avons pas tenu compte du taux d'absentéisme du personnel et de certains usagers (par exemple, des élèves et des enseignants). Les prochaines études devront mentionner ces chiffres.

Les différents coefficients d'efficacité mettent en évidence que la moitié des équipements font agir plus de personnel qu'ils en emploient. Le volume fréquentation est plus élevé que le volume ressource. Par conséquent le temps utilisé par les usagers est supérieur au temps offert par le personnel. Ce type de pattern se rencontre pour les actions offertes en simultanéité. L'autre moitié des BS (coefficient d'efficacité compris entre 0 et 1), indique un volume ressource supérieur au volume fréquentation. L'emploi du temps est décomposé ainsi : l'établissement offre davantage de temps que les usagers en ont besoin. Ce type de résultat semble

caractériser les services ayant recours à la successivité de l'action. Résumons les différentes caractéristiques des BS sur le site étudié : (a) il y a une égalité entre action offerte en simultanéité et action offerte en successivité sur le quartier; (b) la majorité des personnes intervenants dans le QS1 sont domiciliées à l'extérieur; (c) ces salariés sont en grande partie d'origine Française et employés en contrat à durée indéterminée; (d) les habitants n'occupent pas d'emplois dans leur quartier. Quand le cas se présente, les individus sont employés pour effectuer des tâches requérant des mécanismes comportementaux faisant intervenir les grands muscles : lever, se baisser...les tâches physiques. Les personnes d'origine étrangère sont les destinataires de ces emplois précaires : Maghrébins et Africains; (e) la vitalité réelle dans le quartier semble se situer autour de l'équipement 12 c'est-à-dire le restaurant kebab-bar-tabac-pmu. C'est le seul qui ne soit pas établissement scolaire ou centre communal d'action social. Le quartier se décompose donc en privilégiant l'éducation, l'animation et un petit commerce. L'éducation se focalise sur l'intervention des enfants entre 0 et 3 ans, 3 et 6 ans, 6 et 10 ans, 10 et 16 ans. Selon les statistiques de la Caisse d'Allocations Familiales, au 31/12/2005, le quartier QS1 comptait, respectivement, dans ces quatre tranches d'âges : 75 enfants ; 70 ; 104 et 161. La population constituée par les enfants de 11-14/15/16 sur le quartier représente seulement 20% des usagers de l'équipement 4 c'est-à-dire le collège. 80% des usagers sont extérieurs au quartier. Le secteur afférant à l'administratif semble peu intéressant. Les habitants fréquentent peu ces BS.

1) La masse totale de l'action

C'est la somme des masses des 12 BS $1030 + 4522 + 4178 + 27839 + 22.83 + 14 + 449 + 55 + 5 + 122 + 324 + 327 = 38887.83$

Nous arrondissons à 38888.

Le poids de chaque BS dans cette masse totale de l'action est le suivant (E = équipement) :

E1 = $1030/38888 = 2.6\%$	E2 = 11.6%	E3 = 10.7%
E4 = 71.6%	E5 = 0.06%	E6 = 0.04%
E7 = 1.15%	E8 = 0.14%	E9 = 0.013%
E10 = 0.31%	E11 = 0.83%	E12 = 0.84%

2) Aspects sociologiques/psychosociologiques : comparaison de QS1 avec d'autres quartiers

Le personnel devait répondre à la question suivante : selon vous, comment les habitants perçoivent-ils leur quartier en comparaison avec d'autres quartiers tout en tenant compte des éléments suivants ?

- les services - les équipements - les réseaux techniques
- les transports - la population - la qualité de la vie

Chacun de ces éléments ou services était évalué sur une échelle d'attitude en cinq points :

1, beaucoup moins bien ; 2, moins bien ; 3, semblable ; 4, mieux ; 5, beaucoup mieux.

Les usagers du site devaient répondre à la question : *comment percevez-vous vos relations avec d'autres quartiers ?* L'échelle d'attitude ainsi que les éléments évalués sont les mêmes que précédemment. Pour effectuer le calcul des moyennes sur l'échelle d'attitude, pour tous les services, nous avons attribué le score de 1 à 5 comme indiqué ci-dessus.

Deux principaux commentaires :

- Nous remarquons que, sur une échelle d'évaluation en 5 points : 1, beaucoup moins bien ; 2, moins bien ; 3, semblable ; 4, mieux ; 5, beaucoup mieux ; le quartier QS1 est jugé par l'ensemble de la population inférieur aux autres quartiers, à l'exception des transports qui sont jugés semblables. Pour autant, le quartier n'est pas jugé d'une manière très négative. On pourrait le situer globalement entre le *moins bien* et le *semblable* avec la valeur moyenne de 2.56.

- Les deux profils, usagers, résidents dans le quartier et le personnel des établissements dont un certain nombre de membres des établissements scolaires résidant à l'extérieur ont des évaluations très proches. Toutefois, un point fait la différence : c'est la qualité de la vie : usagers (3.14). C'est une question qu'il conviendrait de réexaminer auprès d'un échantillon plus large, représentatif de la population résidente. Cela permettrait de vérifier s'il y a un effet de stéréotype dans le jugement des personnes extérieures et s'il y a par voie de conséquence une correction par les habitants.

Discussion et perspectives

La technique d'étude des B.S. permet de mesurer les ressources d'un milieu et par conséquent les liens, les transactions entre les individus et la société qui font la cohésion sociale dans une démocratie. Chaque société devrait être concernée autant par les questions de justice, de santé, d'éducation que celle du lien, de la communication, de la préoccupation des équipements et de leurs fonctions sociales. Il est dès lors urgent d'étudier les B.S. afin d'observer les comportements et leur évolution dans un monde sans cesse en changement et de plus en plus sous tension. L'observation sur un quartier dit sensible consistait à enregistrer des comportements sociaux des individus dans les lieux mêmes de leurs activités ou de leurs résidences sans intervention dans le déroulement ordinaire. L'objectif étant de dégager les principaux résultats d'une enquête éco-comportementale urbaine : le dénombrement des équipements et les transactions entre des individus et ces équipements dans un quartier dit sensible. Ces résultats confirment notre hypothèse de départ. L'analyse va dans le sens de la construction de quartiers dits sensibles selon une logique à faire émerger un sentiment d'injustice subie : fort taux de chômage, petits boulots ou autrement dit occupation des « sales boulots », les salariés extérieurs sont de plus en plus incorporés à la gestion de ces dispositifs d'où fuite peu à peu et discrètement des salariés et des structures etc. (absentéisme, maladie, démission, délocalisation des structures...). Mais ces résultats sont à prendre avec précaution principalement parce que notre observation est davantage une étude exploratoire en vue de tester un matériel et une méthode.

Cependant, ce que nous avons appris au cours de cette enquête va dans le sens d'une adaptation de la théorie originelle à l'applicabilité dans le contexte Français. Une fois cette méthodologie maîtrisée, des observations théoriques prennent peu à peu une consistance. En effet, par exemple, selon Mead (1934), la communication en tant que processus de transaction permet à l'individu de se projeter à l'extérieur de soi pour s'observer et prendre conscience de ses actes, des actes des autres et construire une forme de penser et d'agir. La mise à l'écart, la passivité, au contraire, favorisent l'addition des handicaps : échec, rejet social, repli sur soi, alcoolisme, drogues, chômage. Dans le droit fil de la pensée Meadienne, il serait plus prégnant de parler de « *ghettoisation comportementale* », de « *ghettoisation sanitaire* » et de « *ghettoisation mentale ou intellectuelle* ». Pour apporter une tentative de réponse à notre question ci-dessus : l'environnement doit-il éliminer l'individu ? Malthus n'avait-il pas avancé l'idée théorique en son temps ? N'en vient-on pas, depuis plusieurs années déjà, à une nouvelle forme de technologie invisible et insidieuse mais efficace (Foucault, 2004a,b), pour la

réduction des populations à travers la manipulation ou la disparition de certains équipements (e.g., tribunaux, commerces de proximités, cabinets médicaux, pharmacies, boulangerie), organes vitaux pour les personnes ? Il est légitime, pour le chercheur en sociologie, en psychologie sociale et plus largement, pour les sciences de l'Homme et de la société de se poser la question. Darwin écrivait en 1859 (P.128), « *Tout ce que nous pouvons faire, c'est de nous rappeler à tout instant que tous les êtres organisés s'efforcent perpétuellement de se multiplier selon une progression géométrique; que chacun d'eux à certaines périodes de sa vie, pendant certaines saisons de l'année, dans le cours de chaque génération ou à de certains intervalles, doit lutter pour l'existence et être exposé à une grande destruction...Ce sont les êtres vigoureux, sains et heureux qui survivent et se multiplient* ». Au centre de cette recherche, la contribution principale s'articule autour du paradigme justice/injustice-structures-comportements. Des travaux complémentaires nécessitent, par exemple, des réflexions sur sentiment d'injustice subie et santé, structures et maladie et/ou bien-être, le concept de transaction sociale, l'accumulation des tâches dans certaines structures et l'impact sur l'offre de services, les représentations sociales des structures par les usagers.

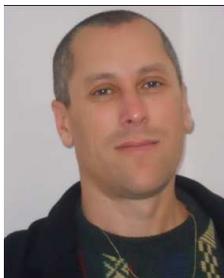
Bibliographie

- Barker R.G., *Ecological psychology : concept and methods for studying the environment of human behavior*, Stanford, Stanford University Press, 1968.
- Barker R.G., *Midwest and its children*, New York , Harper and Row, 1955.
- Barker R.G., Schoggen P, *Qualities of community life : methods of measuring environment and behavior applied to an American and English town*, San Francisco, Jossey-Bass, 1973.
- Blanc P.M., La transaction sociale : genèse et fécondité heuristique, *Pensée Plurielle*, 2009/1, 20, p. 25-36.
- Dubet, F., *Injustices : l'expérience des inégalités au travail*. Paris, Seuil, 2006.
- Foucault M., *Sécurité, territoire, population*, Paris, Gallimard et seuil, 2004a.
- Foulcault M., *Naissance de la biopolitique*. Paris, Gallimard et seuil, 2004b.

- Giboux C., L'espace public comme lieu de transactions sociales : une lecture à partir des pratiques de loisirs urbains, *Pensée Plurielle*, 2009/1, 20, p. 153-165.
- Goffman, E., *La mise en scène de vie quotidienne : 1. la présentation de soi*. Paris, Les Editions de Minuit, 1973a.
- Goffman, E., *La mise en scène de vie quotidienne : 2. les relations en public*. Paris, Les Editions de Minuit, 1973b.
- Goutas N., Goutas A., Sentiment d'injustice subie et ségrégation : des déterminants pour comprendre l'agression chez l'enfant et l'adolescent, *Revue Internationale de Criminologie et de Police Scientifique et Technique*, 4, 2008, p. 387-402.
- Goutas, A., Goutas, N., & Vieille-Marchiset, G. Sentiment d'injustice subie et agression : réactions comportementales. *Revue Internationale de Criminologie et de Police Technique et Scientifique*, vol. LXIII, 2010, p. 293-314.
- Moore, B., *Injustice : The social bases of obedience and revolt*. Stanford : Ray Freiman & Compagny, 1978.
- Walster E., Walster G.W., Berscheid E., *Equity : theory and research*, Boston , Allyn and Bacon, 1978.



Azeddine GOUTAS, a été travailleur social durant quinze ans dans des quartiers dits sensibles. Actuellement sociologue-chercheur, ses travaux s'intéressent entre autres, aux phénomènes de "violence urbaine", aux travailleurs sociaux...



Nasrédine GOUTAS, est maître de conférences en psychologie sociale à l'université d'Angers (I.U.T. d'Angers-Cholet). Il s'intéresse, plus particulièrement aux problématiques sociales telles l'agression/la violence, les affects, la justice et l'injustice, les territoires.

***Théorie comptable et gouvernance de l'entreprise
Pour un dépassement des visions actionnariale et
partenariale***

Michel Baupin *

** MCF – laboratoire NIMEC, Université de Caen - IUT Cherbourg rue
Max Pol Fouchet – 50100 Cherbourg-Octeville,
michel.baupin@unicaen.fr*

**Sections de rattachement : 6
Secteur : tertiaire**

RÉSUMÉ : *Dans cet article, nous tentons d'apprécier la pertinence des deux visions de la gouvernance de l'entreprise qui influencent la manière de concevoir la comptabilité, la relation entre la comptabilité et la gouvernance étant fondée sur la recherche par celle-ci de l'efficacité organisationnelle. La vision actionnariale répond à la théorie du « propriétaire » selon laquelle l'entreprise représente ses propriétaires et n'a pas d'autonomie propre, l'objet de la comptabilité étant alors d'établir des comptes en vue de comparer les valeurs que sont les revenus, les coûts et leur solde appelé « résultat » qui n'a de sens qu'à l'égard des propriétaires qui en sont les bénéficiaires. Cette conception a été réinterprétée depuis une trentaine d'années, mais en la déformant, par la théorie positive de la comptabilité de Watt et Zimmerman. A l'opposé, la vision partenariale répond à la théorie de l'« entité » selon laquelle les comptes sont envisagés sous l'angle de la séparation de l'entreprise et de ses propriétaires qui sont alors considérés comme de simples créanciers au même titre que les autres prêteurs (Geschäftstheorie). Le capital apporté doit alors être géré car il représente un « coût », notion qui débouche sur une véritable mutation managériale. A partir d'un examen de la littérature, nous montrons la pertinence d'une approche de l'entreprise comme une fiction patrimoniale fondée sur un nœud de marchés. Nous examinons alors la question de la théorie comptable sous l'angle de l'acte d'échange, valeur pour valeur, précisant ainsi la notion de gouvernance.*

MOTS-CLÉS : *valeur d'échange, création de valeur, rente, coût du capital, théorie du propriétaire, théorie de l'entité, théorie de l'agence, théorie positive de la comptabilité fiction patrimoniale, nœud de marchés.*

Introduction

Les scandales financiers de cette dernière décennie, comme ceux d'Enron-Anderson et de Worldcom aux Etats-Unis, d'Ahold aux Pays-bas, de Parmalat en Italie, de Vivendi en France sans oublier ceux des nombreuses banques et compagnies d'assurance lors de la crise récente, ont, d'une part, conduit les législateurs à réagir (loi Sabarnes-Oxley de juillet 2002 aux Etats-Unis, loi de sécurité financière du 1er août 2003 en France...) et, d'autre part, ouvert de nombreux débats sur le mode de gouvernance de l'entreprise. Selon Charreaux et Wirtz (2006), la gouvernance désigne « l'ensemble des mécanismes qui ont pour effet de délimiter les pouvoirs et d'influencer les décisions des dirigeants, autrement dit, qui 'gouvernent' leur conduite et définissent leur espace discrétionnaire ».

C'est avec l'émergence de la théorie positive de l'agence, dont les pionniers furent Jensen et Meckling (1976), qu'une explication de la gouvernance allait commencer à se construire. Selon cette théorie, en confiant la gestion de son capital au dirigeant (l'agent), le propriétaire (le principal) se trouve souvent face à des divergences d'objectifs et des asymétries d'information qui entraînent des conflits d'intérêt. Ceux-ci sont à l'origine de coûts d'agence qui correspondent aux pertes de richesse que les propriétaires doivent supporter et qui n'existeraient pas en leur absence. La gouvernance constitue alors une réponse à ces conflits sous la forme d'un dispositif comportemental constitué de leviers d'action dont l'utilisation devrait permettre de régir les relations internes et externes entre les dirigeants et les autres parties prenantes de l'entreprise. Pour cela, ces relations doivent être gérées au moyen de contrats, implicites ou explicites, l'organisation étant alors conçue comme un « nœud de contrats » (Jensen et Meckling, 1976), c'est-à-dire un processus contractuel complexe organisé pour créer de la richesse. Il s'ensuit que le principe explicatif des systèmes de gouvernance repose sur l'efficacité organisationnelle qui est mesurée par une création de valeur. En « gouvernant » la conduite des dirigeants, les systèmes de gouvernance sont ainsi supposés influencer le processus de création de valeur à travers les décisions d'investissement et de répartition de la richesse créée. La comptabilité devant servir à fournir, entre autres, une mesure de la valeur créée, l'évolution dans le temps des théories comptables est allée de pair avec celle des systèmes de gouvernance. En posant comme hypothèse que le mode de répartition de la valeur créée

influence le niveau de celle-ci, nous pouvons identifier deux manières d'expliquer cette création : soit la valeur créée revient uniquement aux actionnaires et l'on est alors dans une vision actionnariale à laquelle répond la théorie comptable du propriétaire, soit elle est partagée entre toutes les parties prenantes et l'on est dans une vision partenariale à laquelle répond la théorie comptable de l'entité.

Jusqu'à la fin du 19^{ème} et le début du 20^{ème} siècle, l'entreprise a été conçue à travers la notion de société telle qu'elle est définie par le droit. Sa gouvernance posait souvent des problèmes dans les sociétés de capitaux, les petits porteurs s'estimant lésés par les pratiques des dirigeants au service des administrateurs. Ces conflits trouvaient leur origine dans le manque d'information sur la gestion, la comptabilité n'étant organisée que pour contrôler l'action des dirigeants. Le modèle comptable qui exprimait cette vision de l'entreprise était celui du propriétaire selon lequel seuls les détenteurs de parts sociales participaient à la société et s'en partageaient les résultats. Il s'agissait ici d'une gouvernance actionnariale qui supposait une conception statique de la comptabilité cherchant à donner une image de l'entreprise en valeurs de marché au moment de l'établissement du bilan (Richard, 2005).

Les travaux de Taylor (1911) et de Fayol (1916) ont permis de penser l'entreprise comme étant un objet de management distinct de la société définie par le droit (Segrestin et Hatchuel, 2009). L'entreprise doit mettre en œuvre une dynamique collective visant à créer de nouvelles ressources qui devront être réparties entre ses membres selon un principe d'équité et de solidarité. A cette dynamique collective correspond une gouvernance partenariale de l'entreprise qui est considérée comme une entité séparée de ses propriétaires (Paton, 1922), ceux-ci étant assimilés à de simples créanciers au même titre que les autres prêteurs. Le modèle comptable de l'entité qui lui est associé et dont Courcelle-Seneuil (1872) en France et Folsom (1873) aux Etats-Unis en firent une première proposition, est conçu de manière dynamique en s'appuyant sur le principe de la continuité des exercices et sur une valorisation des actifs à leurs coûts historiques (Schmalenbach, 1961).

D'une forme rudimentaire portant sur la tenue des livres, la recherche en comptabilité a cherché à s'orienter au cours d'une évolution lente mais constante vers une conception fondée sur une démarche scientifique positive. Ainsi, en s'inspirant de la démarche positive en économie, élaborée par J. N. Keynes (1891) et reprise par M. Friedman (1953), R. L. Watts et J. L. Zimmerman (1978, 1979 et 1986) de l'Ecole de Rochester ont essayé de déplacer la « théorie comptable » de sa conception normative selon laquelle il s'agissait d'expliquer « ce qu'elle

devrait être » au regard d'un système de valeurs vers la construction positive d'un ensemble de connaissances expliquant « pourquoi la comptabilité est ce qu'elle est, pourquoi les comptables font ce qu'ils font et quels effets ces phénomènes ont sur les gens et sur l'allocation des ressources » (Jensen et Meckling, 1976). Développant l'idée, dans leurs articles de 1978 et 1979, que la comptabilité n'est pas neutre car elle est le reflet des choix des dirigeants cherchant à maximiser leur utilité personnelle, ils ont tenté d'élaborer les lois du comportement de ceux-ci, notamment dans leurs relations contractuelles avec les actionnaires. Leur modèle comptable est construit comme une application particulière de la version financière de la théorie positive de l'agence (Jensen et Meckling, 1976). Il est fondé sur des statistiques de choix d'options sur les marchés financiers et de corrélation entre les cours de bourses et les décisions comptables qui ont été réellement prises dans les entreprises qu'ils ont étudiées. En fondant leur théorie sur l'étude du comportement des dirigeants dans leurs relations avec les actionnaires mais aussi avec les pouvoirs politiques et les instituts de normalisation comptable, Watts et Zimmerman ont déformé le cadre de la vision actionnariale en présentant l'entreprise comme une marchandise faisant l'objet d'un commerce sur les marchés financiers.

Nous proposons dans cet article de dépasser ces conceptions pour contribuer à construire une théorie de la comptabilité fondée sur une vision de la gouvernance de l'entreprise conçue comme fiction patrimoniale représentée par un nœud de marchés. Pour cela, après avoir présenté, paragraphe 1, la gouvernance actionnariale associée au modèle comptable du propriétaire et au paragraphe 2, celle qui est partenariale associée à celui de l'entité, nous utiliserons le marché pour proposer, paragraphe 3, une gouvernance associée au modèle comptable de l'échange marchand.

1. Gouvernance actionnariale et théorie comptable du propriétaire

Lorsque la comptabilité en partie double s'est imposée en France dans le milieu industriel, à partir de la première moitié du 19^{ème} siècle, les dirigeants, pour autofinancer leurs investissements, ont commencé à passer de manière systématique des écritures comptables d'amortissement. Utilisant pour cela une grande partie de leurs marges bénéficiaires, ils ont souvent limité les dividendes distribués et tenté d'en

régulariser le cours. Or, si l'autofinancement peut être considéré comme une conception logique et naturelle dans les entreprises familiales, il en va différemment dans les sociétés de capitaux notamment vis-à-vis des petits porteurs, cette pratique allant jusqu'à déclencher d'après conflits d'intérêts entre les administrateurs des sociétés de capitaux ou les dirigeants qui les représentaient et les ayants droits aux bénéfices. Malgré quelques tentatives, on ne réussira guère à discipliner les pratiques¹ avant que n'intervienne le 15 juillet 1914, après sept années de débats parlementaires et l'imminence de la guerre, une loi qui vint bouleverser les données du problème en instaurant l'imposition des revenus² et l'obligation de constater des amortissements en comptabilité pour déterminer l'assiette imposable.

Ces conflits ne faisaient qu'exprimer des problèmes de gouvernance liés aux insuffisances de l'information financière ne présentant que le résultat comptable, parfois manipulé par les dirigeants, comme seule mesure de la performance. Si le coût des dettes était considéré comme une charge, ce n'était pas le cas des capitaux propres. Ce n'était pas l'entreprise en tant que telle qui était perçue mais la société qui en était le support juridique et dont le fonctionnement s'appuyait sur le modèle comptable du propriétaire, proche de la théorie mathématique de Léauté et Guilbault (1889). Selon ce modèle, c'est la société définie par le droit qui existe et non l'entreprise qui, de ce fait, n'a pas d'autonomie propre et représente exclusivement ses propriétaires qui sont juridiquement les seuls pouvant percevoir les rentes dégagées.

Ainsi, la mesure comptable fut très tôt orientée pour satisfaire les intérêts des propriétaires de la firme. Il n'est qu'à observer la disposition du compte de résultat pour s'en convaincre. Celui-ci intègre un ensemble de flux positifs censés représenter l'enrichissement de l'entreprise pendant l'exercice et de flux négatifs donnés comme son appauvrissement durant la même période. La confrontation des deux ensembles permet d'aboutir au « résultat de l'exercice ». Or, celui-ci ne mesure pas la rentabilité nette dégagée par l'entreprise puisque le traitement comptable réservé aux dividendes versés aux propriétaires n'est pas identique à celui des intérêts

¹ « Le 3 juillet 1914, dans le conflit opposant Lucien Bailly — un ingénieur des Mines devenu le défenseur des actionnaires mécontents — aux Forges et fonderies de Montataire, le Tribunal de commerce de la Seine prend la décision de confirmer la souveraineté de fait des administrateurs de sociétés en matière de politique de dividendes » (Yannick Lemarchand, 1993).

² Elle fut complétée par celle du 31 juillet 1917 qui précisa les différentes cédules imposables, parmi lesquelles les bénéfices industriels et commerciaux, puis, par le décret du 12 décembre 1948. Elle fut remplacée par un « impôt sur le revenu des personnes physiques » (IRPP) et un « impôt sur les bénéfices des sociétés et autres personnes morales ».

versés aux prêteurs. Bien que les deux dépenses rémunèrent l'une comme l'autre des apporteurs de fonds, les intérêts sont enregistrés parmi les charges alors qu'il n'existe aucun poste comptable qui soit consacré aux dividendes. La raison en est simple : le résultat de l'exercice mesure en réalité la variation de la situation nette de la société entre le début et la fin de l'exercice, c'est-à-dire le surplus qui doit revenir aux propriétaires, lesquels peuvent en laisser une partie plus ou moins importante au service de l'autofinancement de l'entreprise.

Cette vision actionnariale de la gouvernance s'inscrit directement dans la théorie juridico-financière de la firme qui repose sur l'hypothèse traditionnelle que tous les apporteurs de facteurs de production sont rémunérés à leur coût d'opportunité. Celui-ci correspond à leur rémunération d'équilibre permettant de compenser le risque encouru et supposée le plus souvent égale au prix du facteur établi sur un marché concurrentiel. S'il existe un surplus, il ne peut revenir qu'aux actionnaires qui en ont le pouvoir légitime de par leur droit de propriétaires prenant seuls les risques. Ce surplus est une rente pour les propriétaires et correspond normalement à une création de valeur par l'entreprise d'où son appellation maintenant consacrée de « valeur actionnariale ».

La crise économique de 1876, avec son lot de faillites et de concentration du capital, eut comme conséquence de faire apparaître, notamment aux Etats-Unis, le besoin de managers salariés, ayant reçu une formation à la direction, dans les grandes sociétés par actions appelées pour cette raison « sociétés managériales ». Progressivement, les actionnaires délèguèrent leur pouvoir de décision à ces dirigeants. En France, Fayol est l'illustration même de ce mouvement lorsqu'il obtint les pleins pouvoirs de son conseil d'administration après avoir sauvé de la faillite les mines de Commentry.

Avec la crise de 1929 et la recherche des responsabilités, allait naître un besoin d'explication d'une gouvernance caractérisée par l'abandon progressif par les actionnaires de leur pouvoir en faveur des dirigeants. Un cadre théorique permettant d'appréhender les systèmes de gouvernance commença à émerger avec Schumpeter (1911 et 1943) lorsqu'il établit la relation entre l'entrepreneur innovateur et le phénomène de « destruction créatrice » de richesses économiques. Cependant, c'est Berle et Means (1932) qui sont reconnus comme ayant posé les premiers jalons explicatifs sur les conséquences néfastes pour l'entreprise de la séparation du droit de propriété et de la fonction de direction³ : en laissant une latitude quasi totale d'action aux

³ Elle est à l'origine de la création de la Securities and Exchange Commission (SEC) aux États-Unis pour protéger les intérêts des petits porteurs.

managers, les sociétés allaient devenir inefficaces. Ce débat fut ensuite relayé par J. Burnham⁴ (1941) et diffusé mondialement par J. K. Galbraith⁵ (1967) accréditant l'idée que les managers, formant la « technostructure », s'étaient installés en maîtres dans les fauteuils autrefois occupés par les propriétaires. Coase (1937), de son côté, proposa de caractériser l'entreprise comme une « structure de gouvernance » pouvant opérer les mêmes fonctions que le marché mais dans des conditions plus efficaces grâce à la structure contractuelle dont elle était dotée. Avec ces différents apports théoriques, la gouvernance venait d'être identifiée comme un objet de recherche.

A la fin des années 1960, Jensen et Meckling (1976) posèrent les bases d'une approche se voulant scientifique de la gouvernance en proposant la théorie positive de l'agence selon laquelle les divergences d'objectifs entre les managers et les propriétaires pouvaient provoquer des asymétries d'information susceptibles de faire apparaître les phénomènes traditionnels de risque moral et de sélection adverse. Ceux-ci sont à l'origine des coûts d'agence tels que ceux relatifs à la surveillance des dirigeants, à leurs choix de développement mais aussi à la perte résiduelle que leurs actions peuvent entraîner. Le propriétaire, en mettant en place des mécanismes disciplinaires et de contrôle associés à des incitations financières (Caby et Hirigoyen, 2001), va chercher à motiver, à surveiller et à sanctionner les dirigeants de façon à ce que les gains dégagés par la coopération des uns avec les autres ne soient pas dissipés. Pour obtenir ce résultat, la gouvernance doit être conçue comme une réponse organisationnelle à ces conflits d'intérêts ainsi que le proposent Jensen et Meckling (1976) lorsqu'ils avancent que l'organisation est « le point focal d'un processus contractuel complexe, par lequel les objectifs conflictuels des individus atteignent l'équilibre. En ce sens, la conduite d'une organisation est comme celle d'un marché, qui n'est que la résultante d'un processus complexe de recherche de l'équilibre ». Le principe explicatif de la gouvernance, qui en constitue aussi l'enjeu central du point de vue normatif, ne peut que reposer sur « l'efficacité organisationnelle » dont la mesure correspond à la valeur créée.

Dans le prolongement de la thèse de Demsetz (1967) et d'Alchian (1969) sur les droits de propriété, la théorie positive de l'agence postule que les parties signent des contrats *qui* ne sont pas exclusivement juridiques mais sont définis comme tout procédé par lequel des droits de propriété sur des biens sont créés, modifiés ou transférés. Il s'agit d'une

⁴ Le manager, en remplaçant le capitaliste, prend le pouvoir dans l'entreprise.

⁵ Avec les progrès de la [technologie](#), ce sont les managers constituant la technostructure qui prennent effectivement les décisions dans le cadre de la filière inversée.

entente dont le contenu va être négocié par chacune des parties au contrat. La théorie positive de l'agence présente ainsi l'entreprise comme une fiction juridique représentée par un « nœud de contrats », implicites ou explicites, qui régissent les relations internes (entre ses membres) et externes (entre ceux-ci et les tiers), la gestion de ces contrats par le seul mécanisme des prix sur le marché ne permettant pas de créer le maximum de valeur en raison des asymétries d'information et des conflits d'intérêt. Elle privilégie l'étude des relations entre actionnaires et dirigeants car la coopération entre eux s'applique à la fois au processus de création de valeur et à l'appropriation de la valeur créée, et se justifie par le fait qu'ils ont besoin de mutualiser leurs ressources pour réaliser un projet qui leur soit collectivement bénéfique. Les conflits potentiels d'intérêts ne peuvent alors que porter sur les ressources respectives qu'ils doivent engager et sur le partage de la rente globale issue de leur action, le problème induit étant celui d'une mesure de cette rente que la comptabilité doit fournir.

Or, au cours des années qui suivirent l'éclatement du système monétaire international après la suppression par le président Nixon, en août 1971, de la convertibilité or du dollar, le contexte dans lequel évoluaient les entreprises a radicalement changé. La discipline des marchés financiers dérégulés construite sur le système de taux de changes flottants s'est progressivement substituée aux mécanismes de la régulation monétaire fondée sur des taux de change fixes. Des quantités considérables de liquidités furent disponibles sur le marché et favorisèrent la financiarisation de l'économie ainsi que l'émergence d'une société d'endettement. Pour les dirigeants cherchant à financer le développement de leurs entreprises se posa alors le choix entre faire appel au marché financier afin d'augmenter le capital ou s'adresser aux banques en empruntant. En partant du théorème du capital-valeur formulé par Irving Fischer (1930)⁶, la solution à ce problème émergea de la théorie financière initiée par les modèles de Modigliani et Miller (1958) qui firent accepter l'idée que, dans un monde sans taxes, exonéré de coûts de transaction et sous l'hypothèse de l'efficacité des marchés, la valeur marchande de l'actif économique d'une entreprise n'était pas affectée par le choix d'une structure de financement entre capitaux propres et dettes. Cela revenait à dire que, par l'acceptation de la notion d'« effet de levier », le capital possédait un « coût » que les dirigeants pouvaient comparer à celui de l'endettement afin de choisir la meilleure combinaison possible de ces deux sources de financement. Dans ces

⁶ Le théorème d'I. Fischer s'énonce de la manière suivante : « la valeur de tout bien de capital est égale à la somme des valeurs actualisées des revenus monétaires que la détention et la mise en œuvre de ce bien capital permettent de réaliser » (Cobbaut, 1992).

conditions, un dirigeant pouvait prendre des décisions d'investissement non-conformes au meilleur intérêt des actionnaires parce qu'il n'avait pas à « supporter » le coût des capitaux investis et parce qu'il ne percevait aucune « rémunération » en contrepartie de la valeur créée pour eux. Pour éviter que cela se produise, les systèmes de rémunération des dirigeants furent alignés sur les méthodes d'affectation des capitaux, ce qui permit d'adapter le fonctionnement de l'entreprise sur la création de valeur.

Parallèlement à cette situation, l'importance croissante dans l'économie des fonds de pension et des investisseurs institutionnels, jugés chaque année sur le rendement de leurs opérations et, de ce fait, beaucoup plus exigeants en termes d'objectifs de rentabilité et plus actifs en termes d'analyses stratégiques, obligèrent les managers à optimiser en permanence la valeur des actions de l'entreprise, ce qui les amena à confondre leur stratégie financière avec la gestion opérationnelle des activités. Face à la pression très forte des marchés financiers, ces nouveaux actionnaires exercèrent une contrainte économique sur l'entreprise en l'obligeant à rémunérer les capitaux propres qu'ils apportaient. Pour l'entreprise, c'est une nouvelle contrainte qui apparaissait dans la mesure où la rémunération des capitaux propres n'était plus considérée comme un revenu résiduel mais comme un impératif fondamental. Il ne s'agissait plus de créer de la valeur pour l'actionnaire de manière sporadique mais de manière constante en cherchant à maximiser la valeur actionnariale. En exigeant un taux de rentabilité minimum, les investisseurs financiers ont incité les dirigeants à faire jouer l'effet de levier favorisant le recours à l'endettement.

Par ailleurs, Merton (1973), en cherchant à compléter la théorie du portefeuille de Markowitz (1952) et en reprenant les travaux de Black et de Scholes, a publié un article montrant que l'on peut obtenir la stabilité d'un portefeuille de titres en combinant, selon la proportion appropriée, des opérations de vente ou d'achat sur les titres eux-mêmes et sur les options qui en sont des dérivés. Or, leur modèle est fondé sur l'hypothèse d'une action qui ne donne aucun dividende entre le moment de l'évaluation de l'option et l'échéance de celle-ci, ce qui revient à nier l'existence d'un authentique marché du capital et à promouvoir comme critère d'une bonne gestion la plus-value spéculative sur le cours des titres. L'application concrète de ces modèles justifiant le recours à l'endettement et à la spéculation ont pris leur essor à partir de 1980 lorsque, pour se prémunir contre le risque de rendement et de prix des actions mais aussi contre le risque des taux d'intérêt, des analystes financiers ont commencé par souscrire des produits dérivés (swaps, options...) qui prenaient souvent la forme d'options pouvant s'acheter et se vendre sur un marché. Cela les a amené à prendre des positions très spéculatives en fabriquant des produits financiers à fort effet de levier et

général à court terme des gains qui rendaient inaudible tout argument mettant en évidence le haut niveau de risque induit. La prise de risque s'est alors épanouie sans entrave parce que les dirigeants ont sacrifié l'intérêt de leur entreprise pour réaliser d'énormes profits dont ils étaient, parfois et en partie, les bénéficiaires. Un nombre croissant de transactions financières se sont réalisées au moyen de ces produits dérivés qui, n'ayant pas de coût à l'origine, ne sont pas, dans le modèle comptable traditionnel, comptabilisés au bilan alors qu'ils peuvent être générateurs de pertes colossales comme nous l'a montré l'expérience récente. D'ailleurs, dès la fin des années 1980 aux Etats-Unis, les graves défaillances d'institutions financières avaient commencé à être interprétées comme étant le résultat des limites du modèle comptable traditionnel d'évaluation au coût historique. Celui-ci aurait montré son incapacité à révéler en temps utile aux utilisateurs de l'information comptable la situation financière des banques utilisant des produits dérivés (Barth, Landsman et Wahlen, 1995).

Dans ce nouveau contexte économique, spéculatif et propice à l'endettement, les dirigeants furent « obligés » d'aligner le pilotage et l'organisation de leurs entreprises sur l'objectif de valeur actionnariale recherchant une rentabilité des capitaux investis supérieure au coût de l'ensemble des ressources financières mobilisées, chargé d'établir une relation étroite entre les décisions d'investissement et les décisions de financement. Ce coût est estimé habituellement par le modèle d'équilibre des actifs financiers (MEDAF) à condition de supposer que le marché des capitaux soit efficient⁷. La valeur actionnariale est devenue le nouveau credo des dirigeants des grandes entreprises. Elle est aujourd'hui le critère essentiel du marché financier même si, d'une manière ou d'une autre, il semble que ce concept ait toujours existé dans l'esprit des dirigeants des entreprises.

Cette notion de « coût du capital » est centrale dans la légitimation de celle de « création de valeur ». Le capital et les dettes étant considérés comme étant de même nature, la valeur marchande de l'entreprise ne dépend plus du tout de la composition des modes de financement, capitaux et emprunts, dont elle dispose, ce qui marque une rupture radicale avec la conception traditionnelle de la performance et modifie profondément la gouvernance, les dirigeants pouvant intervenir sur la structure du capital au moyen de l'effet de levier. La théorie positive de l'agence (Jensen et Meckling, 1976) va fournir une légitimité à cette nouvelle gouvernance.

⁷ Cette notion de création de valeur ne fait que transposer au niveau global de l'entreprise, les principes mis en œuvre dans la théorie financière classique de la valeur actuelle nette (VAN) dans les choix d'investissements.

Cette problématique de la création de valeur actionnariale marqua une rupture radicale avec la conception traditionnelle de la performance. C'est ainsi que l'opinion classique selon laquelle le marché porte un regard perspicace sur les bénéfices comptables fut remise en question à la suite de nombreuses études initiées par Beaver (1968) ainsi que par Ball et Brown (1968) qui montrèrent que la publication du résultat comptable traditionnel avait un effet très limité sur le comportement du marché financier, celui-ci ayant déjà anticipé les évolutions par d'autres canaux informationnels. Les résultats de ces études et de celles qui suivirent trouvèrent un écho très fort dans le plaidoyer majeur développé par le professeur de finance américain Alfred Rappaport (1986), l'un des pères du renouveau de la « création de valeur pour les actionnaires ». Celui-ci affirma que les indicateurs comptables et autres ratios traditionnels n'offraient qu'un tableau de bord volumétrique, peu propice aux extrapolations qualitatives en termes de stratégie à suivre. Ces indicateurs traditionnels, qui pouvaient perdurer tant que les marchés financiers n'exigeaient pas une certaine rentabilité, furent ainsi frappés d'obsolescence, ne répondant pleinement ni aux besoins des marchés financiers ni à ceux du management. De nombreuses méthodes, telle que l'EVA® (Economic Value Added ou « création de valeur intrinsèque », popularisée au milieu des années 1990 par le cabinet Stern Stewart qui l'a créée), ont été mises au point pour mesurer cette création de valeur dont elles ont d'ailleurs permis la vulgarisation dans le monde entier, le « coût du capital » étant la pierre angulaire de leur construction. Cette notion de « coût du capital » vient jeter un doute sur le respect des caractéristiques du modèle comptable du propriétaire. Cela, d'autant plus, qu'en raison de nombreuses distorsions comptables, le total de l'actif tel qu'il figure au bilan ne correspond ni à la valeur de réalisation des actifs, ni à leur valeur de remplacement, ce qui oblige à le corriger très finement. En effet, la logique même de la théorie positive de l'agence conduit à préconiser une information comptable basée sur des données non susceptibles d'être affectées par les décisions comptables des dirigeants. Cela impose que les évaluations des éléments d'actifs reposent le plus possible sur des évaluations de marché et non sur un coût historique amorti et que, dans le même temps, la performance de l'entreprise soit appréciée non pas au travers d'agrégats comptables sur lesquels le management peut avoir prise mais au contraire sur des indicateurs de liquidité, lesquels offrent une meilleure garantie aux apporteurs de capitaux. C'est ce que propose par exemple l'EVA® qui évalue les firmes à partir d'une logique de liquidité s'inscrivant dans une cohérence d'ensemble avec certaines prescriptions des normes IFRS fondées sur la valorisation des actifs à la valeur de marché. Une telle cohérence doit être reliée à une analyse en termes de basculement conventionnel conduisant à mettre en relief

l'influence des attentes des apporteurs de ressources externes sur la constitution et l'évolution de l'information comptable.

Les nouvelles normes comptables telles que les IAS 32 et 39 témoignent de cette rupture dans les pratiques comptables qui consistent à abandonner le coût historique comme base des évaluations au profit de la « juste valeur ».

Estimant la comptabilité traditionnelle incapable de fournir des états qui soient réellement informatifs pour le marché financier, mais aussi insuffisante dans l'explication de certains choix comptables par les dirigeants, l'Ecole de Rochester a proposé une nouvelle formulation à travers la théorie positive de la comptabilité. Etant fondée sur le paradigme de l'utilité contractuelle de l'information comptable, elle repose sur le concept de Market for Excuses qui exprime la production par les dirigeants de justifications *ad hoc* servant d'alibis aux décisions qu'ils prennent. Cherchant à éclairer la genèse des états financiers à partir du comportement des producteurs et des utilisateurs de l'information comptable, elle emprunte ses schémas de raisonnement à la théorie positive de l'agence et à la théorie économique de la réglementation⁸.

Pour la première, les mesures comptables jouent un rôle déterminant dans le suivi des contrats, ce qui place la comptabilité au cœur des relations d'agence. Ce rôle central conduit à formuler le problème du choix des méthodes et des normes comptables à partir de modèles fondés sur la rationalité économique des dirigeants et des propriétaires appréciée en termes de rémunérations et d'endettement.

Pour la seconde, la finalité des réglementations étant d'effectuer des transferts de richesses, les valeurs comptables fournissent une base pour le politiciens puissent argumenter auprès de leurs électeurs du bien fondé des mesures prises et de celles qu'ils proposent, notamment en termes de normalisation et de réglementation comptable.

Selon la théorie positive de la comptabilité, les choix comptables les plus significatifs réalisés par les dirigeants, en fonction des situations dans lesquelles ils se trouvent, concernent :

- l'intégration des intérêts des emprunts dans le coût des immobilisations à l'actif au lieu de les comptabiliser en charges,
- le choix de la méthode d'amortissement, linéaire ou accéléré,
- le choix de la méthode d'évaluation des stocks, FIFO ou LIFO,
- l'intégration des coûts de recherche et développement à

⁸ Posner (1974) dans le cadre de l'Ecole du Public Choice

l'actif au lieu de les comptabiliser en charges.

Avec la vision actionnariale de la gouvernance déformée par le prisme de la théorie positive de la comptabilité, on cherche à obtenir des bilans en valeurs actuelles comme dans la phase statique de la comptabilité au 19^{ème} siècle mais, contrairement à elle, la perspective de liquidation de l'entreprise n'est pas retenue : les entreprises se transforment et se recomposent, leur gouvernance aussi. Elles sont conçues comme des paniers d'activités relativement autonomes pouvant faire l'objet d'échanges sur le marché financier, au mépris de la prise en compte des autres parties prenantes à l'activité (Chiapello, 2008). Le changement de dénomination des normes, qui de « comptables » (IAS) deviennent « financières » (IFRS), constitue une révolution qui modifie l'orientation de la pratique de la comptabilité depuis ses origines car elle n'est plus au service du développement économique fondé sur l'activité industrielle et commerciale mais au service des marchés financiers. Pourtant, ce modèle contractualiste actionnarial qui légitime le pouvoir ultime des actionnaires dans l'entreprise, est en totale contradiction avec les discours et les pratiques managériales qui mettent l'accent, dans le cadre d'une conception institutionnaliste et partenariale des entreprises, sur les responsabilités sociétales (Capron, 2006).

Ainsi, la gouvernance traditionnelle destinée à servir la création de valeur actionnariale présente des limites. En se fondant sur la théorie de l'agence et en privilégiant la relation entre les dirigeants et les actionnaires, la maximisation de la valeur actionnariale à court terme se fait souvent sur un plan pratique au détriment du potentiel humain. Cette vision réductrice de la performance conçue uniquement dans sa dimension financière a conduit au modèle de création de valeur partenariale qui se fonde sur la théorie des parties prenantes. Au plan théorique, cette approche par les parties prenantes s'inscrit, comme celle par les propriétaires, dans la théorie de l'agence. Cette conception de la valeur élargie aux différents stakeholders veut mettre en évidence le fait que la création de valeur ne résulte pas seulement de l'apport de capitaux par les actionnaires mais des efforts conjugués de tous les partenaires.

2. Gouvernance partenariale et théorie comptable de l'entité

La définition de l'entreprise du point de vue de l'actionnaire comme un ensemble d'investissements de capacités de production qui dégagent ou non une rentabilité supérieure au coût d'opportunité du capital ne fait pas l'unanimité. Il suffit d'écouter le langage « politiquement correct » ambiant pour se rendre compte que la croissance en termes de chiffre d'affaires, de bénéfice et de retour sur action constitue le principal repère auquel se réfèrent de nombreuses directions générales pour séduire leur actionnariat. Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, la théorie positive de l'agence, à partir des notions de conflits d'intérêts et d'asymétrie informationnelle, fournit une justification théorique opportune à cette conception de la gouvernance. Depuis les années soixante-dix, les pratiques réelles de gouvernance dans les entreprises déployaient cette approche au travers de pratiques financières de plus en plus sophistiquées dont les agences de notation sanctionnaient le respect.

Cependant, devant son incapacité à éviter les scandales de ces dix dernières années mais aussi à répondre aux défis posés en termes de responsabilité sociale de l'entreprise (RSE) par l'émergence de nouveaux acteurs, individuels ou organisationnels, rassemblés sous l'appellation « parties prenantes », la vision de la gouvernance actionnariale est remise en cause. Dans la pratique des entreprises, les discours sur la gouvernance se multiplient en faisant l'objet d'adaptations régulières et constantes.

Pour rendre compte de cette situation, le cadre d'analyse traditionnel de la gouvernance actionnariale a connu un premier élargissement à la suite des travaux de Milgrom et Roberts (1992) qui contestent l'identité supposée entre création de valeur et valeur pour les actionnaires car les décisions de la firme entraînent des conséquences pour l'ensemble des parties prenantes. Cette conception d'une gouvernance partenariale qui consiste à aligner la capacité à saisir les opportunités de croissance en mobilisant toutes les ressources dont dispose l'entreprise et l'appropriation des gains qui en sont issus n'est cependant pas nouvelle.

Dès la fin du 19^{ème} siècle et le début du 20^{ème}, de nouvelles règles et de nouvelles pratiques dans de multiples domaines ont marqué un tournant décisif dans la conception de la gouvernance de l'entreprise :

- la notion de contrat de travail a commencé à se développer,
- la loi sur les licenciements collectifs, lois relatives à la prévention et à la réparation des accidents du travail ont été votées,

- les actionnaires ont abandonné progressivement leur pouvoir aux dirigeants,
- la réorganisation du système bancaire a mieux répondu aux attentes des entrepreneurs,
- le marché financier a commencé à s'ouvrir aux entreprises industrielles,
- Taylor a proposé que l'entreprise construise de nouveaux savoirs pour mieux utiliser les nouvelles machines et gérer les interfaces entre activités et métiers,
- Fayol a montré que la logique commerciale ne suffisait plus à expliquer l'activité de l'entreprise, la rentabilité se construisant par le développement de nouvelles ressources, notamment organisationnelles, issues d'un nouveau savoir-faire qui n'existait pas encore sur le marché.

Ces dynamiques de changement ont eu des conséquences très importantes sur le modèle comptable du propriétaire en vigueur à l'époque, en raison de l'introduction de nouvelles parties prenantes qui vont amener un déplacement de l'objet de la comptabilité : celle-ci ne doit plus répondre à un objectif de recouvrement de l'ensemble des dettes mais doit permettre de mesurer la capacité de l'entreprise à s'inscrire dans un processus de croissance sur une longue période. Cette évolution a fait tendre le modèle comptable du propriétaire vers celui de l'entité qui est directement issu de la théorie « unicontiste » de Courcelle-Seneuil (op. cité) et de Folsom (op. cité), lesquels envisagent les comptes sous l'angle de la séparation de l'entreprise et de ses propriétaires qui deviennent ainsi de simples créanciers au même titre que les autres prêteurs. La notion d'entreprise va percer l'écran du droit des sociétés et devenir la référence incontournable concernant aussi bien les petites affaires que les grandes multinationales. Devant sa réussite, elle émerveille et inquiète à la fois, à tel point que l'Etat s'en saisit tout en lui permettant de se déployer mais sans jamais lui reconnaître de qualification juridique particulière, ce qui va alimenter la confusion avec la société définie par le droit. La comptabilité va subir le contrecoup de cette confusion en empilant au cours du temps des règles qui produisent de nombreuses anomalies pour donner naissance à des aberrations qui faussent la perception que l'on peut avoir de l'entreprise. Deux exemples parmi d'autres illustrent cette évolution : les biens financés par crédit-bail ne figurent pas à l'actif du bilan mais ceux acquis à crédit avec une clause de réserve de propriété y sont inscrits alors que la clause en frappe l'acquisition. A cette confusion comptable correspond une perception floue de la gouvernance de l'entreprise. Selon Saussois (1994), Fayol qui

avait reçu comme mission par les propriétaires des mines de Commentry formant le conseil d'administration, de liquider celles-ci parce qu'elles se trouvaient dans une situation critique, réussit à les rendre bénéficiaires pendant plus de dix ans. Le conseil d'administration, dont les membres reçoivent d'importants dividendes chaque année, lui délégua alors son pouvoir de décision qui passa ainsi de leurs mains dans celle du dirigeant Fayol.

Le problème qui se posa fut de disposer d'outils capables de mesurer la valeur créée pour les parties prenantes. La notion de valeur créée doit être à même, selon le principe d'efficacité organisationnelle, de prendre en compte l'intégralité de ces dernières, ce qui pose aussi le problème de la répartition de la rente qui est dégagée. Celle-ci doit pouvoir être mise en relation avec les contributions respectives de chaque partie prenante à travers, notamment, leurs compétences-clés, ce qui suppose que l'on accorde un rôle central à l'investissement et non plus au financement comme dans l'approche actionnariale. Dans ce cadre, la théorie comptable du propriétaire semble peu adaptée à une analyse de la création de valeur reposant sur la vision contractuelle de la firme mettant celle-ci en relation avec ses différents partenaires sous forme d'un jeu coopératif à travers une chaîne de valeur telle qu'elle a été proposée par Porter (1982). Elle semble également peu pertinente pour analyser la création de valeur dans les nouvelles formes de firmes de type virtuel qui, à la limite, ne possèdent aucun actif matériel car il est alors impossible de mesurer une performance sur la base des capitaux investis, ces derniers étant apparemment nuls.

Pour résoudre le problème de la mesure de la valeur créée et de sa répartition entre les parties prenantes, plusieurs méthodes existent dont celle des comptes de surplus de productivité globale issue des travaux menés à la fin des années 1960 par une équipe d'économistes rassemblés autour de Marcel Boiteux et Pierre Massé respectivement directeur d'EDF et président du Conseil d'administration d'EDF. L'idée de cette méthode consiste à calculer le surplus de productivité globale entre deux périodes comme une augmentation du volume des produits plus que proportionnelle à celle des facteurs nécessaires pour les obtenir, puis à le répartir entre les parties prenantes à l'entreprise en utilisant les variations de prix. Cette méthode qui permet une articulation entre création et distribution de richesses est très lourde à mettre en œuvre de par la finesse des informations dont il faut disposer de manière volumétrique sur les facteurs de production.

Charreaux et Desbrières (1998) proposent une autre méthode en considérant tout d'abord la chaîne de valeur la plus simple d'une entreprise dont le dirigeant est en même temps le propriétaire unique et

qui ne dispose que d'un seul fournisseur et d'un seul client. Du côté du fournisseur la valeur créée (100 € par exemple) est égale à la différence entre le prix payé par la firme (le coût explicite = 200 €) et le « coût d'opportunité », soit le prix minimum requis par le fournisseur pour entreprendre ou produire une transaction (100 €). Cette même analyse peut être transposée du côté du client. Il y a valeur créée si le client obtient le produit à un prix (900 €) inférieur à son « prix d'opportunité », c'est-à-dire le prix qu'il aurait été disposé à payer (1 000 €). La valeur créée (900 €) est alors égale à la différence entre le prix d'opportunité pour le client (1 000 €) et le coût d'opportunité pour le fournisseur (100 €). La part revenant à l'entreprise étant égale au prix perçu (900 €) diminué du coût explicite des ressources, la valeur créée se répartit de la manière suivante : entreprise = $900 - 200 = 700$ € avec client = $1\ 000 - 900 = 100$ et fournisseur = $200 - 100 = 100$. Cette répartition finale est supposée dépendre des pouvoirs respectifs de négociation de l'entreprise, du client et du fournisseur compte tenu de leurs perceptions respectives des prix et des coûts.

En généralisant cette méthode à toutes les étapes de la chaîne de valeur, la valeur partenariale créée se calcule par différence entre les ventes au prix (ou coût) d'opportunité et la somme des coûts d'opportunité des parties prenantes. L'existence d'asymétries d'information et de rapports de pouvoir favorables à l'entreprise où à chaque partie prenante, explique l'écart entre le coût d'opportunité et le coût (ou prix pour les clients) explicite effectivement supporté par l'entreprise. Nous pensons que ce raisonnement est tautologique et ne produit pas de réelle explication de la répartition de la richesse créée. En reprenant l'exemple numérique ci-dessus, il nous semble que si le prix payé au fournisseur est de 200 € alors qu'il se serait contenté de 100 €, la différence appelée ici « valeur créée » pour le fournisseur ne puisse être que de... 100 €. Notre objection s'applique de la même manière au client et à l'entreprise. La valeur créée ne peut provenir d'une soustraction qui n'est qu'une opération arithmétique de telle sorte que si le fournisseur avait accepté d'être payé 150 € par exemple, la seule conclusion à laquelle nous aurions abouti est la valeur créée pour lui est... 50 € (sauf à faire une erreur de soustraction). Le raisonnement proposé par Charreaux et Desbrières (1998) « tourne en rond » ce qui nous le fait qualifier de « tautologique ». Notre obligation en tant que chercheur est de trouver le mécanisme explicatif de la création de valeur et celui-ci ne peut se réduire à un mode de calcul, c'est-à-dire à une soustraction.

S'il est très difficile, comme dans la méthode des comptes de surplus de productivité globale, de traduire comptablement ces notions de « coûts et de prix d'opportunité », le modèle comptable de l'entité

répond globalement de manière assez satisfaisante à cette nouvelle approche de la gouvernance de l'entreprise. L'évolution des règles comptables semble montrer, comme l'expriment de nombreux auteurs, que ce modèle a progressivement dominé l'élaboration des différents systèmes comptables en donnant à l'entreprise son autonomie en même temps que le droit lui reconnaissait une personnalité propre.

Cependant, cinq remarques viennent nuancer ce constat :

- 1) le respect du principe d'entité qui reconnaît à la firme le statut d'unité économique indépendante, devrait réserver aux dividendes un traitement comptable identique aux intérêts versés au prêteur. Les deux dépenses rémunèrent l'une comme l'autre des apporteurs de fonds. Or, si les seconds sont enregistrés parmi les charges, on ne trouve dans le compte de résultat aucun poste consacré à la rémunération du propriétaire qui subit ainsi un sort particulier. Le modèle de l'entité ne permet donc pas de rendre compte véritablement de la création de valeur et de sa répartition,
- 2) dans le bilan, les postes « capital, réserves et résultat » sont toujours dissociés des dettes. Cela correspond au fonctionnement normal du marché et traduit bien la reconnaissance par la comptabilité que les actionnaires ne sont pas des créanciers de l'entreprise,
- 3) toutes les parties prenantes qui apportent des ressources devraient faire l'objet d'un enregistrement comptable, ce qui n'est pas le cas : la compétence des salariés, l'image de marque de l'entreprise, etc., autant d'éléments qui ne sont pas quantifiables et qui ont trait au qualitatif, au social et à l'environnement,
- 4) comme dans l'approche financière de la comptabilité selon le modèle de la gouvernance actionnariale, le capital apporté doit être, à fortiori, géré par l'entreprise dans le modèle comptable de l'entité pour le coût qu'il est supposé représenter. Pour cela, certains normalisateurs, soucieux d'assurer une meilleure information sur les éléments de ce poste, ont exigé qu'ils soient comptabilisés à leur « juste valeur » (« fair value »), permettant ainsi de les enregistrer au bilan dès la date de leur négociation au « prix instantané » du marché. Cette nouvelle pratique comptable revient, en définitive, à remettre en cause la notion même du capital⁹ c'est-à-dire de l'entreprise et des parties prenantes à celles-ci,
- 5) lors de l'exercice des stock-options, l'entreprise en tant qu'entité distincte ne subit aucun appauvrissement : il y a bien une augmentation de capital et une création d'actions, mais elle ne

⁹ dans la mesure où le principe de fixité de sa valeur, selon la règle fondamentale instaurée le 11 juillet 1818, n'est plus respecté

supportera aucune charge en tant qu'entité. Elle ne subira aucun flux de trésorerie négatif. Au contraire, c'est l'inverse qui se produira puisqu'en cas de levée des options, les bénéficiaires apporteront dans les caisses de la société la somme correspondant au produit de la valeur de souscription par la quantité de titres émis à cette occasion. En conséquence, les états financiers de l'entreprise considérée comme une entité ne devraient pas refléter un élément qui n'affecte pas son patrimoine propre... sauf à considérer qu'elle n'a justement pas de patrimoine propre et n'est qu'un prolongement de ses actionnaires. La comptabilisation comme une charge d'une forme de rémunération comme les stock-options dont le coût ne pèse pas sur l'entreprise elle-même en tant qu'entité mais sur l'actionnaire, entraîne la confusion du patrimoine de l'apporteur des capitaux et de celui de l'entreprise qui les met en œuvre dans le cadre de son activité, ce qui la fait apparaître comme une sorte de prolongement patrimonial de l'actionnaire. Il apparaît que l'augmentation de capital correspondant à l'exercice des options aboutirait mécaniquement à un amoindrissement de l'avoir détenu par les anciens actionnaires. La charge ainsi supportée serait proportionnelle à l'écart entre le prix d'exercice de l'option et la valeur du titre. C'est bien cette approche du « propriétaire » que propose la norme IFRS2. En effet, selon les normes comptables jusqu'en 2004, ces options n'avaient aucun impact dans le compte de résultat des actionnaires, alors qu'elles contribuaient à la rémunération des salariés, diluant potentiellement la participation des actionnaires et donc abaissant, toutes choses égales par ailleurs, le bénéfice par action. L'Union européenne ne retenait aucune forme de comptabilisation, tout au plus, en France, une information à fournir dans l'annexe. Seul, le FASB avait prévu deux règles : la valeur intrinsèque (norme APB25) et la juste valeur (norme (FAS123). La première (APB25) recommandait depuis 1972 d'enregistrer en charge de rémunération le coût correspondant à la valeur intrinsèque de l'option, soit l'excédent du cours de l'action principale sur le prix d'exercice d'une option. La seconde (FAS123) qui fut instaurée en 1995 préconisait pour sa part d'apprécier le coût des options à la date d'attribution en fonction de la valeur d'octroi tout en faisant l'objet d'une actualisation sur la période de service. La charge, dans ce dernier cas, est étalée sur la durée de l'option. La norme FAS123 remplaçait l'APB25 mais laissait à l'entreprise le choix entre les deux méthodes. Après l'affaire Enron, la loi Sarbanes-Oxley a inclus un texte contraignant les sociétés à passer à la norme FAS123. Les entreprises ne disposaient plus dès lors du choix qui

leur était offert entre la norme APB25 et FAS123. Cette loi entra en vigueur le 15 juin 2005 après que la SEC (Securities and Exchange Commission) eût donné son aval. L'IASB, contraint de réagir, publia en février 2004 la norme IFRS2 qui oblige les groupes cotés à inscrire dans leurs charges le coût lié à l'exercice ultérieur des options de souscription (ou d'achat), c'est-à-dire à comptabiliser les paiements en actions et assimilés et ce à partir de 2005. La règle prévoit comme principe général que l'octroi d'instruments de capitaux propres qui rémunèrent des biens ou services obtenus, entraîne une évaluation à leur juste valeur et une comptabilisation en charges au fur et à mesure de leur consommation. Cette réglementation révèle en fait l'influence grandissante de l'actionnaire sur l'échiquier politique de l'entreprise.

Au regard des pratiques comptables, il est difficile aujourd'hui de désigner parmi les deux théories, celle du propriétaire et celle de l'entité, laquelle a dominé la conception du modèle comptable utilisé actuellement. Si beaucoup d'auteurs considèrent que la théorie de l'entité a progressivement dominé l'élaboration des différents systèmes comptables, force leur est de constater que les actionnaires ne sont toujours pas considérés comme des parties prenantes de même nature et jouant le même rôle que les autres. Pour ces raisons, nous proposons une autre voie pour concevoir la théorie comptable et la gouvernance qui lui est associée en repartant du rôle de l'entreprise sur le circuit des échanges.

3. Gouvernance fondée sur l'acte d'échange et théorie de la comptabilité

D'un côté, la gouvernance actionnariale a servi de cadre à de très nombreuses études empiriques dont les résultats sont, dans l'ensemble, contradictoires et peu concluants.

D'un autre côté, la gouvernance partenariale a permis un élargissement du débat sur la création et la répartition de la valeur à toutes les parties prenantes tout en restant prisonnière de la vision contractuelle financière, sa problématique ne faisant aucune référence sur l'origine des connaissances qui fondent les compétences distinctives sur

lesquelles s'appuient les stratégies de création de valeur. En effet, si l'importance du lien entre les compétences et la rente organisationnelle est reconnue, la problématique reste fondée sur une conception statique et adaptative de l'efficacité. La valeur est maximisée à un instant donné et l'origine de l'ensemble des opportunités d'investissement reste exogène. Les seuls leviers permettant d'agir sur la valeur sont les systèmes d'incitation ou de mesure de la performance.

Ces difficultés des visions actionnariale et partenariale pour expliquer les gouvernances des entreprises et leurs modèles comptables associés, nous semblent avoir comme origine une prise en compte insuffisante de ce qui fait la spécificité de l'entreprise par rapport aux autres organisations : elle est créée et elle fonctionne pour réaliser de la manière la plus efficace possible des échanges sur ses marchés. C'est l'échange marchand qui distingue l'entreprise de toutes les autres formes d'organisations et qui la rend irréductible à celles-ci et c'est son étude qui doit nous permettre de proposer une explication cohérente de la gouvernance et de la comptabilité de l'entreprise, ces deux éléments interagissant en permanence l'un sur l'autre. La comptabilité construit la gouvernance tout en étant modifiée par les pratiques de celle-ci. En supposant que l'échange marchand est premier dans la conception de la gouvernance de l'entreprise, nous devons expliquer quelles sont ses caractéristiques une fois qu'il a été réalisé, notamment pour appréhender la création de valeur.

Nous pensons que le chercheur en comptabilité et en gestion n'a pas à se préoccuper en priorité des motivations et des comportements de ceux qu'il envisage d'aider. Il doit leur fournir une explication cohérente, non pas de ce qu'ils auraient dû faire mais des conséquences possibles de ce qu'ils font. Autrement dit, pour expliquer l'échange et la création de valeur, nous devons nous situer après l'acte d'échange de manière à identifier tout ce qui le concerne et non pas avant en nous substituant au dirigeant. Le rôle de celui-ci est de préparer l'échange en prenant des décisions qui permettent à son entreprise d'être la plus efficace possible sur ses marchés. Ce positionnement après l'acte d'échange est fondamental dans la mesure où nous pourrions l'observer du dehors sans y prendre part puisqu'il a eu lieu, ce qui nous permettra de produire une théorie à la fois explicative et normative de la comptabilité et de la gouvernance :

- explicative car nous pourrions alors identifier toutes les composantes de l'échange dans sa totalité et dire quels critères il doit respecter¹⁰,

¹⁰ En procédant de cette manière, notre démarche s'inscrit dans la logique et non dans l'histoire.

- normative en comparant à ces critères ce que font les entreprises dans la réalité, l'objectif n'étant pas de leur dire comment faire mais ce qui risque d'arriver si elles continuent dans la voie où elles se sont engagées.

En nous plaçant après l'acte d'échange nous constatons que la valeur trouve son origine, non pas avant mais au moment où il se produit quand la vente se réalise. En cela, la notion de « chaîne de valeurs » de Porter (1982) entretient la confusion sur cette origine. En effet, aucune entreprise n'a jamais, à proprement parler, créé de la valeur puisque celle-ci n'est qu'un nombre enregistré dans un compte après qu'une vente ait eu lieu. En conséquence, la valeur « créée » par l'entreprise ne peut provenir que de la valeur d'échange.

Pour préciser quelles sont les conditions d'un échange marchand, les recherches anthropologiques, notamment celles Malinowski (1963) sur la « Kula » et de Mauss (1923-1924) sur le « don », nous fournissent des éléments de réponse :

- les hommes ne veulent pas être lésés dans leurs échanges. Ceux-ci ne peuvent se concevoir que de manière égalitaire, l'égalité portant sur les valeurs échangées, comme le montre l'étude de la pratique de la Kula par Malinowski chez les Trobriandais, même si cette pratique est une institution extrêmement vaste et compliquée qui englobe toutes sortes d'activités réagissant les unes sur les autres,
- l'échange dont le dénouement est différé dans le temps doit être producteur d'une « rémunération » avec, au minimum, conservation de la valeur de ce qui est échangé à l'instar des pratiques de potlatch des Maoris de Nouvelle-Zélande comme l'a très bien montré Mauss.

Ces pratiques ancestrales et universelles nous amènent à penser l'échange comme devant se réaliser « valeur pour valeur », ce qui fournit un principe permanent, a-historique et donc objectif, permettant de l'expliquer. De plus, il doit être porteur d'un surplus lorsqu'il se déroule sur la durée, c'est-à-dire que le profit résulte de l'échange lui-même.

Tout en acceptant l'idée que la valeur est un concept polysémique, omniprésent en sciences de gestion, la seule notion de valeur qui permette de mesurer la rente dégagée par l'entreprise est donc celle de valeur d'échange telle qu'elle a été définie en fonction du temps de travail par les fondateurs de l'économie. Reprenant cette conception, nous l'avons légèrement modifiée en remplaçant le travail par la « compétence », étant entendu que celle-ci entretient des relations très

étroites avec le temps de travail nécessaire pour l'acquérir. Il s'ensuit que la gouvernance de l'entreprise doit s'appliquer, avant tout et surtout, à vérifier que les dirigeants préparent au mieux l'acte d'échange sur le marché en optimisant l'utilisation des compétences dont ils disposent afin de maximiser la valeur correspondante.

Cette valeur d'échange qui appartient au monde de la théorie a besoin du « prix du marché » pour pouvoir être exprimée dans la réalité. Le prix du marché est ce que nous constatons sur le marché à un moment donné. Le moment suivant, il peut être différent selon l'intensité du jeu qui existe entre les vendeurs et les acheteurs. Pour que le prix du marché soit le reflet, même vacillant, de cette valeur d'échange, il est nécessaire que celle-ci présente les caractéristiques suivantes :

- elle est insensible au jeu instantané entre l'offre et la demande sur le marché, ce qui signifie que le jeu concurrentiel du marché doit toujours ramener le prix du marché vers la valeur d'échange,
- n'ayant pas d'existence réelle, elle ne peut pas être un attribut du produit, ce qui signifie que la valeur d'un produit n'apparaît qu'au moment de l'échange et qu'en amont de celui-ci, au moment de sa production, de son stockage et de l'organisation de sa vente, l'entreprise engage des dépenses mais, en aucun cas, ne crée de la valeur,
- socialement, nous avons conscience que c'est la compétence mise en œuvre pour produire qui permettra de comparer la valeur des biens et des services les uns par rapport aux autres. Ainsi, si un bien n°1 demande deux fois plus de compétence qu'un autre bien n° 2 pour être produit, stocker et distribuer, le prix du bien n° 1 devrait être sensiblement le double de celui du bien n° 2 si le marché fonctionne dans de bonnes conditions de concurrence,
- cette compétence est elle-même fonction de l'état de développement historique et scientifique de la société. Son appropriation par les êtres humains représente un coût social, ce qui nous permet de dire que la valeur d'échange peut se comprendre comme étant un coût social.

Ainsi, créer de la valeur (dans la réalité) signifie, en définitive, ne pas perdre de valeur (dans la théorie) d'une période à l'autre et c'est un des rôles fondamentaux de la comptabilité que de constater dans les comptes cette reproduction de la valeur dans le temps. Cela suppose, entre autres, que l'épargne investie soit rémunérée au minimum au taux de profit moyen en vigueur dans la société et que ce n'est qu'à cette condition qu'elle pourra devenir un « capital ». Cette création supplémentaire de biens et ces ventes se traduit par des enregistrements de prix et/ou de coûts dans la comptabilité. Celle-ci doit donc être définie

et organisée pour permettre de calculer le niveau de « création de valeur » correspondant.

De ce constat nous pouvons déduire que chaque fois que l'échange ne se déroule pas valeur pour valeur, c'est que l'un des deux coéchangistes est lésé par l'autre. Lorsqu'il s'agit d'une entreprise qui arrive à vendre en permanence son produit à un prix de marché supérieur à sa valeur d'échange, c'est que le marché sur lequel elle intervient ne fonctionne pas dans de bonnes conditions de concurrence. La distinction que nous faisons entre le prix de marché et la valeur d'échange nous oblige à analyser sur quoi porte l'échange. Force ici est de reconnaître le glissement sémantique qui, partant de la « maximisation de la richesse » pour les actionnaires ou les parties prenantes, a abouti à retenir comme expression équivalente « création de valeur actionnariale ou partenariale ». Cette substitution de sens nous semble résulter d'une double confusion, d'une part, sur l'origine de la création de la valeur (ou « rente ») et, d'autre part, entre la valeur et la richesse.

En transférant l'origine de la « création de valeur » de l'extérieur de l'entreprise, au moment de l'acte d'échange sur le marché clients, à l'intérieur de celle-ci, les conceptions actionnariales et partenariales de la gouvernance en ont modifié le sens au point que :

- la comptabilité doit s'adapter en prenant en compte la valeur de réalisation des actifs de façon à inciter les investisseurs à maintenir leurs fonds dans l'entreprise,
- pour obtenir la stabilisation, voire l'augmentation permanente des profits, les dirigeants ne peuvent qu'agir sur les rémunérations du personnel,
- le marché, en se globalisant pour limiter le risque financier, ne respecte plus un des principes fondamentaux de son fonctionnement qui veut que chaque échange soit indépendant de tous les autres,
- de nouvelles confusions sémantiques apparaissent entre les notions « de valeur, de prix, de coût et de produit » empêchant le raisonnement de se déployer dans le champ homogène des concepts : en renvoyant le concept de création de valeur qui n'est qu'un nombre à son symbole matérialisé par l'instrument comptable, il devient impossible de saisir l'objet de la « science comptable » car celle-ci se trouve alors chargée de refléter les phénomènes observés alors que son rôle est, au contraire, de les ordonner. Par exemple, en supposant que c'est par la réduction des coûts d'agence que la rente dégagée pourra être augmentée, le problème est supposé résolu. En effet, la rente étant l'excédent des produits sur les coûts, si on veut augmenter celle-ci, il suffit

de réduire ceux-là, notamment les coûts d'agence. Autrement dit, les deux propositions de réduction des coûts et d'augmentation de la rente sont tautologiques comme nous l'avons montré sur un exemple numérique au paragraphe précédent. Pour éviter cet écueil, nous concevons la valeur d'échange comme un construit social sans existence pratique qui, de ce fait, a besoin du « prix du marché » pour pouvoir s'exprimer dans la réalité des marchés. Si, à court terme, le fonctionnement du marché est souvent dominé par les comportements subjectifs des coéchangistes, à long terme, il doit permettre de faire correspondre l'échelle des prix de marché et celle des valeurs d'échange pour que chaque échange tende à se faire « valeur » pour « valeur »,

- la nature de l'entreprise se modifie lorsque les profits dégagés ne sont plus étroitement liés au fonctionnement du marché parce qu'ils résultent d'une volonté d'obtention d'un taux de rentabilité par les actionnaires. En effet, puisque le profit correspond à un taux exigé par les actionnaires, il ne peut plus être associé au risque qu'ils prennent, risque qui peut aussi se traduire par des pertes. Sans le risque qui peut aussi bien s'exprimer par un profit ou une perte pour les propriétaires, il n'y a plus d'entreprise possible. Pour pouvoir raisonner objectivement sur le rôle des actionnaires et des autres parties prenantes à l'entreprise, nous concevons le capital investi comme étant engagé dans un processus d'échange échelonné dans le temps avec le profit futur, les écritures d'amortissement étant chargées de traduire comptablement ce phénomène. De cette manière, la distinction entre le profit et la rente permet de disposer d'un critère objectif de partage de la richesse créée. Le profit qui dépend de l'état de développement économique de la société à un moment donné revient aux stakeholders puisqu'il fait partie intégrante à l'échange « valeur pour valeur » alors que la rente est un surplus qui n'est pas explicable par l'échange et qui provient de l'efficacité des facteurs de production. Ce profit moyen est différent de la notion de coût du capital indispensable dans la gouvernance actionnariale : il est produit par le comportement de la société dans son ensemble et ne doit rien à la volonté subjective de stakeholders d'obtenir un certain niveau de rémunération. En ce sens, ce n'est qu'en fondant la théorie comptable sur l'échange qu'elle pourra devenir une science sociale.

Par ailleurs, La confusion entre la valeur et la richesse rejoint celle entre la valeur et le produit, les conceptions actionnariale et partenariale étant alors amenées à assimiler tout accroissement du nombre de produits destinés à satisfaire les besoins des consommateurs à un

accroissement de valeur, alors que ces deux éléments varient en sens inverse. Cette confusion les empêche de poser correctement le problème de la « création » de la valeur. En effet, au fur et à mesure que le nombre de produits vendus augmente pour un même niveau de compétences utilisées, la valeur unitaire de chacun d'eux diminue. Pour maintenir et, si possible, augmenter leur valeur globale, il faut donc en vendre de plus en plus.

De ce qui précède, il résulte que la préoccupation principale des dirigeants devrait concerner la manière dont l'entreprise va réaliser l'échange sur ses marchés car cela conditionne la « valeur qu'elle va créer ».

Cette « création de valeur » qui permet l'augmentation de la valeur d'échange de l'action ne peut provenir que d'une augmentation des richesses produites et vendues par l'entreprise. Si cette augmentation provient de la spéculation, aucune richesse supplémentaire ne sera associée à celle-ci et il ne nous sera pas possible de dire qu'il y a « création de valeur ». Il ne peut y avoir de véritable création de valeur d'échange que si les profits distribués par l'entreprise résultent de son développement économique. L'existence d'une rente est alors le signe que les dirigeants de l'entreprise font « mieux que le marché ». Or, assigner comme objectif prioritaire et quasi unique aux dirigeants de « faire mieux que le marché », comme le font souvent les actionnaires, revient à ériger en norme de comportement la recherche de cette rente qui est alors interprétée comme un signe distinctif fort d'un bon management. Bien sûr, il nous semble entièrement normal et même de bonne pratique qu'une entreprise cherche à trouver une niche où la concurrence est faible pour ne pas dire inexistante, ce qui lui permet de vendre à des prix tels qu'elle puisse dégager régulièrement des rentes. Mais, tôt ou tard, la concurrence devrait apparaître et risquer de lui faire perdre son avantage compétitif si elle a trop compté sur l'exclusivité qu'il lui procurait. Mais, bien sûr, cela ne veut pas dire pour autant qu'il faille rémunérer les actionnaires avec des dividendes inférieurs au taux du marché.

De plus, en interprétant économiquement l'entreprise par rapport à l'acte d'échange comme nous venons de le faire ci-dessus, nous constatons qu'elle n'est propriétaire de rien. L'autonomie juridique ne lui confère pas l'autonomie économique. Nous pouvons alors compléter la proposition de Jensen en disant qu'elle n'est qu'une fiction patrimoniale qui n'existe que parce qu'elle est engagée dans des échanges marchands, ce qui fait d'elle un nœud de marchés. En effet, son premier marché, elle le passe le jour de sa création par la réunion d'une épargne (le plus souvent hors marché boursier) investie par des personnes physiques ou

morales qui agissent en vue de l'échanger contre des profits futurs. L'échange ne pouvant se réaliser qu'au moyen d'un marché, cet acte fondateur suppose aussi l'existence d'un « droit » à échanger qui impose d'envisager exclusivement d'un point de vue juridique l'enregistrement du montant de cette épargne. Ce droit permet, d'une part, d'identifier chaque apporteur de fonds selon la nature du contrat qui le lie à l'entreprise et, d'autre part, de distinguer le « droit » des propriétaires qui ont investi leur épargne de la « fonction » des dirigeants chargés d'employer celle-ci. Une fois fondée, l'entreprise va engager de nouveaux échanges avec ses clients, ses salariés, ses fournisseurs, etc. qui, par définition, passent tous aussi par un marché. L'entreprise, ensuite, se constitue en un système de cellules interdépendantes (production et vente, sociale, juridique, politique, etc.) qui sera géré de telle sorte que son action sur les différents marchés qui la constituent lui permette de créer le volume de richesses qu'elle souhaite. Si ce n'est pas le cas, l'explication du fonctionnement de ces marchés permettra de dire ce qui pose problème dans la gestion. Autrement dit, c'est l'explication du fonctionnement des marchés constituant l'entreprise qui sert de norme pour dire en quoi sa gestion lui est favorable ou non. Son organisation exprime la manière dont le nœud de marchés est constitué et évolue pour que les échanges se réalisent de la manière la plus efficace possible.

Puisqu'elle ne possède rien en propre, l'entreprise ne peut jamais être, à proprement parler, bénéficiaire ou déficitaire. De ce fait, il n'y a aucune « loi économique » qui puisse assigner au travailleur que le salaire et au capitaliste que le profit, ce qui ne veut pas dire pour autant que la répartition de la rente puisse être, sans dommage pour la société, livrée à l'arbitraire. Pour éviter que cela ne se produise, il est nécessaire de tenir compte, d'une part, de l'égalité qui devrait exister entre le salaire et le capital reconstitué par la compétence et, d'autre part, de l'échange à travers le temps du capital contre le profit.

L'outil comptable doit alors être conçu pour pouvoir contrôler que le comportement des dirigeants reste dans le cadre de ces exigences tenant à l'échange sur les marchés, ce qui suppose impérativement que les actifs soient évalués au coût historique et non pas à la valeur de marché pour éviter d'introduire la volatilité des marchés dans les instruments de contrôle. Il en irait différemment si les marchés fonctionnaient dans de bonnes conditions de concurrence garantissant la coïncidence entre l'échelle des prix et celle des valeurs. Sous ces conditions, la comptabilité améliorerait considérablement la qualité des informations qu'elle produit à être tenue en prix de marché au lieu du coût historique.

Enfin, la valorisation au coût historique et la distinction entre les capitaux propres et les dettes permettent de pouvoir calculer un fonds de roulement qui soit fiable. Or celui-ci la garantie dernière du paiement des salaires si les affaires ont tendance à régresser. Cette garantie est nécessaire si l'on veut rassurer les salariés en leur proposant des contrats de travail à durée indéterminée. En cas d'un fonds de roulement insuffisamment garni en fonds propres, le paiement régulier des salaires n'est plus garanti et l'on voit alors se développer dans l'entreprise des contrats à durée déterminée et des « intérimaires ». Beaucoup de chefs d'entreprises pensent que c'est par ces derniers contrats qu'ils obtiendront de la « flexibilité ». L'analyse de l'acte d'échange nous indique que c'est certainement une erreur d'interprétation car ce qui devrait être flexible au regard de l'échange, c'est l'entreprise et non le salarié.

Ces quelques éléments que nous venons de proposer permettent de concevoir une gouvernance de l'entreprise qui reconnaît que les parties prenantes et, donc, les salariés n'ont pas plus importantes que les propriétaires et vice-versa. Cette conception ne peut devenir une réalité qui si les règles de la comptabilité financière sont déterminées par l'acte d'échange et non par les principes issus des théories de l'entité ou du propriétaire et cela même si la théorie du propriétaire est repensée dans le cadre de la théorie positive de la comptabilité. De la même manière, si la compétence des salariés permet de comprendre le rôle de la valeur d'échange dans la formation du prix de marché, elle ne peut en aucun cas faire l'objet d'un enregistrement comptable car cela supposerait qu'elle puisse être à la fois une cause (celle de la production du bien qui sera vendu sur le marché) et un effet (la valeur d'échange du bien sur le marché). Si nous voulons construire une science comptable, nous devons refuser toutes propositions qui seraient autant d'exceptions à l'enchaînement causal des concepts. A ce titre, après avoir délaissé la théorie comptable du propriétaire, nous faisons de même avec celle de l'entité.

Conclusion

La nouvelle gouvernance des entreprises conçues comme des parties distinctes pouvant faire l'objet de transactions indépendantes sur le marché financier est à l'origine de nombreux dysfonctionnements et de

crises qui remettent en cause la notion même d'entreprise. Les conséquences néfastes pour les salariés de cette situation sont amplifiées par l'utilisation de la « juste valeur » remplaçant celle du coût historique. Pour résoudre ces problèmes, nous proposons un mode de gouvernance qui s'appuie sur la création de valeur au moment de la réalisation de l'acte d'échange du bien vendu sur le marché client. La question de l'origine de la rente se ramène alors à un arrangement efficient des compétences dont l'entreprise dispose et qui lui donne un avantage concurrentiel sur ses marchés. L'évaluation comptable en coût historique joue un rôle fondamental dans la construction de la mesure comptable pour fournir à l'ensemble des parties prenantes de l'entreprise une information qui soit fiable mais aussi pour redonner au « capital » son sens économique d'épargne investie sous risque de profit ou de perte lui permettant de favoriser des pratiques de gouvernance dont l'objectif n'est pas de flexibiliser le travail mais de permettre à celui-ci de se développer dans un climat social minimisant les tensions entre les salariés. Le rôle de la comptabilité est d'enregistrer les opérations marchandes et uniquement celles-ci car elles permettent de vérifier la transmission de la valeur dans le temps. Une théorie des comptes ne peut alors se concevoir que comme une partie de la théorie des échanges économiques. Reste à calculer de la manière la plus précise possible le taux moyen du profit de manière à le comparer au taux moyen des amortissements proposés par la fiscalité toute immobilisation confondue. Il faudrait ensuite proposer les enregistrements comptables mesurant la tendance des échanges à se faire valeur pour valeur. Cela suppose que l'environnement économique soit propice à cette mesure mais ici, nous sortons du cadre de notre étude puisque c'est principalement l'endettement, et notamment le niveau de l'endettement public, qui est concerné.

Bibliographie

Alchian A. A. (1969), "Corporate Management and Property Rights", Economic Policy and the Regulation of Corporate Securities, Washington D-C.

Beaver W. H. (1968), "Information Content of Annual Earnings Announcements", Journal of Accounting Research, University of Chicago Press, Chicago, Vol 6, n° 3.

- Ball et Brown (1968), *Journal of Accounting Research*, University of Chicago Press, Chicago, Vol 6, n° 2.
- Barth M., Landsman W. et Wahlen J.M. (1995), "Fair value accounting: Effects on banks' earnings volatility, regulatory capital, and value of contractual cash flows", *Journal of Banking and Finance*, Vol. 19, June.
- Berle A. et Means G. (1932), "The Modern Corporation and Private Property", Brace & World, Harcourt.
- Burnham J. (1947), "L'Ère des organisateurs", 2^e éd en 1969, Calmann-Lévy, Paris.
- Capron M. (2006), "Les normes comptables internationales, instruments du capitalisme financiers", *Management & Sciences sociales*, l'Harmattan, Paris, n° 2, mars, p. 115-130.
- Charreaux G. et Desbrières P. (1998), *Gouvernance des entreprises : valeur partenariale contre valeur actionnariale*, Finance, Contrôle Stratégie, Vol 1, n° 2, p. 57-88.
- Charreaux G., Wirtz P. (2006), "Le Gouvernement des Entreprises" - Nouvelles perspectives, Editions Economica, Paris, p. 7.
- Chiapello E. (2008), "La construction comptable de l'économie", Observatoire du Management alternatif, HEC Paris, Cahier de recherche, avril.
- Coase R. A. (1937), "The nature of the firm", *Economica*, Paris, Vol 4, p. 386-405.
- Cobbaut R. (1992), "Théorie financière", Economica, collection "Gestion", Paris.
- Courcelle-Seneuil J. G. (1872), "Cours de comptabilité", Librairie hachette et Cie, Paris.
- Demsetz H. (1967), "Toward a Theory of Property Rights", The American Economic Review, Vol. 57, n° 2.
- Fayol H. (1916), "Administration industrielle et générale", Bulletin de la Société de l'Industrie Minérale, n° 10, p. 5-164.
- Fischer I. (1930), "The Theory of Interest", Macmillan, New-York.
- Folsom E. G. (1873), "The Logic of Account", A. S. Barnes, New-York.
- Friedman M. (1953), "Essays in Positive Economics", University of Chicago Press, Chicago.
- Galbraith J. K. (1967), "Le Nouvel État industriel", Gallimard, Paris.
- Keynes J. N. (1891), "The Scope and Method of Political Economy", University of Cambridge, Cambridge.

Jensen M.C. et Meckling W.H. (1976 a), "Theory of the Firm: Managerial, Behavior, Agency Costs, and Ownership Structure", *Journal of Financial Economics*, Vol 3.

Léautey E. et Guilbault A., "La science des comptes mise à la portée de tous, traité de comptabilité domestique, commerciale, industrielle, financière et agricole", Paris, Librairie comptable et administrative et Guillaumin, 1889.

Lemarchand Y. (1993), "Du dépérissement à l'amortissement", Nantes, Ouest Editions.

Malinowski (1963), "Les argonautes du Pacifique occidental", Gallimard, Paris, p. 139-141.

Markowitz, H.M., "Portfolio Selection", *The Journal of Finance*, Vol. 7, mars 1952, p. 77-91.

Mauss M., "Essai sur le don", *L'Année sociologique*, Gallica, T. 1, 1923-1924.

Merton Robert C., "Theory of Rational Option Pricing", *Bell Journal of Economics and Management Science*, n° 4, 1973, p. 141-183.

Milgrom P. et Roberts J., "Economics, Organization and Management", Prentice Hall, 1992.

Modigliani et Miller, "The Cost of Capital, Corporation Finance and the Theory of Investment", *American Economic Review*, juin 1958.

Paton W. A. (1922), "Accounting Theory : With Special Reference to the Corporate Enterprise", The Ronald Press Co, New-York, réédité en 1962 par Accounting Studies Press à Chicago.

Porter M. (1982), "Choix stratégiques et concurrence", *Economica*, Paris.

Posner R. A. (1974), "Theories of Economic regulation", *Bell Journal of Economics and Management Science*, n° 5.

Rappaport A. (1986), "Creating Shareholder Value : the new standart of business performance", Free Press, New-York.

Richard J., "Les trois stades du capitalisme comptable français" in Capron M., *Les normes comptables internationales, instruments du capitalisme financiers*, La Découverte, Paris, p. 89.

Saussois J.-M. (1994), "Henri Fayol ou l'invention du directeur général", cité dans *Les Grands Auteurs en Contrôle de Gestion*, sous la direction d'Henry Bouquin, EMS, Colombelles, p. 23.

Schmalenbach E. (1961 pour la traduction française), "Le bilan dynamique", Dunod, Paris.

Schumpeter J. (1911 et 1935 pour la traduction française), “Théorie de l'évolution économique”, Dalloz, Paris.

Schumpeter J. (1943 et 1951 pour la traduction française), “Capitalisme, socialisme et démocratie”, Payot, Paris.

Segrestin B. et Hatcheuil A., “L'entreprise, une invention moderne en attente de droit ?”, ESKA, Entreprises et Histoire, 2009, n° 57, p. 218-233.

Taylor F. W., “The Principles of Scientific Management”, New York, Harper Bros, 1911.

Watts R. L. et Zimmerman J. L. (1978), “Towards a positive theory of the determination of accounting standards”, The accounting review, Vol. 53, January, pp. 112-134.

Watts R. L. et Zimmerman J. L. (1979), “The Demand for and Supply of Accounting Theories : the Market for Excuses”, The accounting review, Vol. 54, April, pp. 273-305.

Watts R. L. et Zimmerman J. L. (1986), “Positive Accounting Theory”, Englewood Cliffs, Prentice-Hall.



Michel Baupin est Maître de conférences à l'université de Caen - IUT Cherbourg et travaille au laboratoire NIMEC. Sa recherche a pour but de valider l'intérêt de conserver l'utilisation du modèle comptable classique en relation avec la gouvernance de l'entreprise et retenant la notion de coût historique dans l'évaluation de ses actifs et de ses passifs, notamment du capital social et des amortissements. Sa démarche s'inscrit dans une comparaison minutieuse des référentiels comptables français (PCG 99), européen (IAS/IFRS) et américain (US GAAP et FAS) en passant chacune des normes au prisme des deux modèles comptables, celui du propriétaire et celui de l'entité (notamment les IFRS2, IAS32 et 39) en relation respectivement avec les notions de gouvernance actionnariale et partenariale. Parallèlement, il construit une démonstration du rôle de la comptabilité conçue comme un des éléments régulateurs de la violence mimétique telle qu'elle est définie par René Girard de l'Académie Française.

La GAPDH associée à la paroi de Lactobacillus plantarum 299v : étude de son exportation à la surface de la bactérie

N. Saad¹, M. Urdaci², C. Vignoles⁴, S. Chaignepain³, JM. Schmitter³, P. Bressollier^{1,2*}.

¹ *Laboratoire de Chimie des Substances Naturelles, EA 1069, Antenne IUT, Département Génie Biologique, U. Limoges, France*

² *LMBA, UMR 5248 CNRS -U. Bordeaux 1- ENITAB, 1, cours du Général de Gaulle 33140 Gradignan, France*

³ *University of Bordeaux, Institut Européen de Chimie et Biologie (IECB), UMR 5248 CNRS -U. Bordeaux 1- ENITAB, 33607 Pessac Cedex, France*

⁴ *UMR 6101 CNRS, Faculté de Médecine-U. Limoges, France*

***Corresponding author:**

Philippe Bressollier, Laboratoire de Chimie des Substances Naturelles, EA 1069, Antenne IUT, Département Génie Biologique, allée André Maurois- 87065, Limoges, France.

Tel.: +33-5-55-43-44-02. Fax: +33-5-55-43-43-93.

philippe.bressollier@unilim.fr

RÉSUMÉ : *L'objectif de ce travail était d'apporter un nouvel éclairage sur le ou les mécanismes d'exportation impliqués dans la localisation de la Glycéraldéhyde-3-phosphate déshydrogénase, GAPDH, au niveau de la paroi de Lactobacillus plantarum 299v. Après leur purification, les formes cytosolique et pariétale de la GAPDH sont caractérisées et leur identité structurale à l'état homotétramérique est établie. La concentration de la GAPDH associée à la paroi est dépendante de la phase de croissance. Aucune forme libre de l'enzyme n'est détectée dans le surnageant de culture et ceci quelle que soit la phase de croissance considérée. De plus, une lyse bactérienne provoquée n'engendre pas d'accroissement de la concentration en GAPDH pariétale, ce qui invalide l'hypothèse d'une réassociation de l'enzyme à la surface du microorganisme, après sa libération dans le milieu de culture. Ces observations nous ont conduit à formuler l'hypothèse d'un piégeage de la GAPDH au niveau de la paroi, consécutif à son efflux passif au travers de la membrane plasmique ayant subi une altération pendant la croissance de la bactérie. La cytométrie en flux a été mise en œuvre pour*

*suivre l'évolution de la perméabilité membranaire, après marquage des cellules bactériennes par l'iodure de propidium (IP). En mesurant l'internalisation de l'IP et la concentration de la GAPDH pariétale, à différents stades de la croissance, nous avons démontré que les deux paramètres étaient étroitement corrélés. De plus, nous observons que l'accroissement de la perméabilité de la membrane plasmique d'une part et de l'activité GAPDH associée à la paroi d'autre part sont retardés conjointement après addition supplémentaire de glucose dans le milieu de culture. En mettant en œuvre un double marquage des cellules de *L. plantarum* 299v par des anticorps anti-GAPDH et par l'IP, nous avons établi sans ambiguïté que les bactéries dont la membrane plasmique est altérée, présentaient cinq fois plus de GAPDH associée à la paroi, comparativement aux cellules bactérienne intègres. Ces résultats permettent d'établir pour la première fois la corrélation entre un efflux passif d'une « anchorless protein » au travers de la membrane cytoplasmique altérée et la présence de cette même protéine associée à la surface de la bactérie. L'étude du rôle de cette protéine intracellulaire, exportée au niveau de la paroi constitue l'une des perspectives immédiate du travail.*

MOTS-CLÉS : *L. plantarum* 299v, GAPDH associée à la paroi, perméabilité membranaire.

1. Introduction

La glycéraldéhyde-3-phosphate déshydrogénase est une enzyme clé de la glycolyse. Elle catalyse la phosphorylation du glycéraldéhyde-3-phosphate en 1,3 diphosphoglycérate, en présence de NAD (β -nicotinamide adenine dinucléotides) et de phosphate inorganique. Cette enzyme a été identifiée à la surface de nombreuses bactéries Gram positif (Hurmalainen *et al.*, 2007 ; Lamonica *et al.*, 2005 ; Schaumburg *et al.*, 2004 ; Pancholi ans Fischetti, 1992), Gram négatif (Egea *et al.*, 2007 ; Villamon *et al.*, 2003 ; Grifantini *et al.*, 2002), ainsi qu'à la surface de certains champignons et autres organismes eucaryotes (Barbosa *et al.*, 2006 ; Delgado *et al.*, 2001 ; Gil-Navarro *et al.*, 1997).

La GAPDH appartient à la famille des « anchorless ou moonlighting proteins », elle ne possède ni peptide signal, ni motif d'ancrage à la paroi qui pourrait l'orienter vers les voies de sécrétion conventionnelles. Si la présence de la GAPDH ainsi que celles d'autres « housekeeping enzymes » de la famille des "anchorless proteins" à la surface de bactéries Gram positif, est bien établie, les mécanismes mis en

jeu lors de l'exportation de telles protéines du milieu intracellulaire vers la surface de la bactérie ne sont pas élucidés à ce jour.

Récemment, des auteurs ont suggéré, qu'une fois sécrétée à la surface, ces enzymes peuvent se lier par interactions ioniques et/ou hydrophobes à des composants de la paroi cellulaire (Antakainen *et al.*, 2007). En effet, ces auteurs ont montré qu'à pH acide, en dessous de son point isoélectrique (pI= 5,3), la GAPDH est chargée positivement et pourrait ainsi interagir avec des éléments de la paroi chargés négativement comme les acides lipotéichoïques et téichoïques, ce qui serait à l'origine de son association à la paroi. De plus, chez la levure *Saccharomyces cerevisiae*, Delgado *et al.*, 2003 ont suggéré que la localisation de la GAPDH au niveau de la paroi semble dépendre de certains facteurs environnementaux tels que les stress nutritionnel et thermique. Un même constat a été rapporté par Gozalbo *et al.*, 2003 pour la souche pathogène, *Candida albicans*. Chez de nombreux pathogènes, la GAPDH joue le rôle d'antigène et /ou d'adhésine ou invasine (Chhatwal, 2002 ; Pancholi and Chhatwal, 2003 ; Ling *et al.*, 2004) qui facilite la colonisation des cellules de l'hôte et l'établissement d'un état infectieux par interaction avec les constituants de la matrice extracellulaire et/ ou par activation du système de plasminogène (Pancholi and Fischetti, 1992, Pancholi and Fischetti, 1998 ; Gozalbo *et al.*, 1998 ; Bergmann *et al.*, 2001). Cette enzyme a été récemment identifiée à la surface de certains lactobacilles probiotiques, tels que *L. crispatus* ST1, où elle semble se lier au plasminogène (Hurmala *et al.*, 2007) et accélérer son activation. Une forme de GAPDH associée à la paroi a été caractérisée à la surface de souches de *L. plantarum* LA 318 et 423 (Kinoshita *et al.*, 2008 ; Ramiah *et al.*, 2008). Ces auteurs ont mis en évidence l'implication de l'enzyme dans l'adhésion *in vitro* des bactéries à la mucine et aux cellules épithéliales intestinales Caco-2.

L. plantarum est un habitant naturel du tractus gastro-intestinal de l'homme et de l'animal, c'est un microorganisme largement répandu qui occupe diverses niches écologiques (l'eau et le sol). En outre, il est fréquemment isolé à partir de produits carnés et végétaux fermentés (Parvez *et al.*, 2006). Des souches probiotiques de *L. plantarum* sont utilisées pour produire des effets bénéfiques sur la santé du consommateur. Plusieurs études cliniques, ont fait valoir les effets bénéfiques sur la santé de *L. plantarum* 299v, notamment dans le traitement de certains désordres fonctionnels gastro-intestinaux (Niedzielin *et al.*, 2001)

Au cours de ce travail, nous étudions l'origine et l'exportation de la GAPDH associée à la paroi de *L. plantarum* 299v. Dans un premier temps, nous avons isolé les formes cytosolique et associée à la paroi de GAPDH, puis établi leur identité structurale. Nous avons également

observé une augmentation de la concentration de cette « housekeeping enzyme » associée à la paroi au cours de la croissance de la bactérie et avons cherché à identifier des événements physiologiques qui pourraient être à l'origine de l'exportation d'une forme active de l'enzyme à la surface de la bactérie. Après avoir démontré que la présence de la GAPDH au niveau de la paroi ne pouvait résulter d'une adsorption consécutive à l'autolyse bactérienne, nous avons essayé d'établir un lien entre cette présence et des événements survenant au niveau cellulaire au cours de la croissance de *L. plantarum* 299v. La cytométrie en flux (FCM) a été utilisée pour évaluer la perméabilité membranaire et l'activité métabolique. Enfin, un double marquage des cellules bactériennes par des anticorps anti-GAPDH et par l'iodure de propidium a été effectué afin d'établir une corrélation étroite entre la perte de l'intégrité des membranes plasmiques et l'augmentation de la concentration de GAPDH associée à la paroi.

2. Matériels et méthodes

2.1 Souches bactériennes et conditions de culture

La souche probiotique de *L. plantarum* 299v utilisée dans cette étude est commercialisée par la société Probi AB (Suède). La souche est cultivée en milieu MRS (de Man, Rogosa et Sharpe, de Man *et al.*, 1960) à 37°C.

2.2 Extraction des entités protéiques associées à la paroi de *L. plantarum* 299v

Les protéines faiblement associées à la paroi de *L. plantarum* 299v sont isolées à partir de 200 mL d'une culture en début de phase stationnaire. Les cellules sont récupérées par centrifugation à 3500 rpm pendant 10 min puis lavées deux fois avec du tampon phosphate-citrate, pH 5,0. Les culots ainsi lavés sont ensuite resuspendus dans 100 mL de tampon Tris-HCl 0,1 M, pH 8,0 contenant l'EDTA 5 mM et du PMSF 1 mM, puis incubés sous agitation orbitale à 100 rpm pendant 30 min à température ambiante. Les bactéries sont éliminées par centrifugation à 3500 rpm pendant 15 min et le surnageant est filtré sur membrane 0,22 µm (Millipore), dialysé 48h contre 200 volume d'eau distillée et enfin concentré 10 fois puis stocké à -20°C.

2.3 Analyse SDS-PAGE des protéines

Les protéines extraites de la paroi de *L. plantarum* 299v sont analysées par électrophorèse sur gel de polyacrylamide à 10%, en présence de SDS (SDS-PAGE) selon la méthode décrite par Laemmli, 1970. Les protéines sont révélées par coloration au bleu de coomassie (G-250).

2.4 Identification des protéines par spectrométrie de masse en mode MALDI-TOF : établissement de cartes tryptiques

Les protéines séparées sur le gel SDS-PAGE sont récupérées par excision du gel puis soumises à une protéolyse "in-gel" pendant 4h à 37°C dans 30 µL d'une solution de trypsine TPCK (Sigma) à 5 µg/mL dans du tampon NH₄HCO₃ 100 mM, pH 8,0. La digestion tryptique est stoppée par ajout d'une solution H₂O/acétonitrile/acide acétique 40/60/0,1 (v/v). L'extrait peptidique est concentré à un volume final de 25 µl puis conservé à -20 °C. Avant l'analyse par spectrométrie de masse, les mélanges peptidiques sont dessalés sur système Zip C18 (Millipore) selon les instructions du fabricant. Les échantillons protéiques ainsi dessalés sont mélangés volume à volume avec une solution d'acide α-Cyano-4-hydroxy-cinnamique à 4 mg/ml dans H₂O/ACN/ TFA 50/50/0,1 (v/v). Une fraction de ce mélange (environ 2 µL) est déposée au centre de la cible MALDI. Après séchage de la cible, l'analyse des masses des peptides tryptiques est réalisée en mode MALDI-TOF sur un système SM/MALDI-Q-TOF Premier instrument (Waters, Manchester, UK). La désorption/ionisation est réalisée par irradiation à l'aide d'un laser à azote à 337 nm. Les spectres de masses obtenus sont interprétés en se référant aux banques de données Swissprot et NCBI grâce au logiciel MASCOT mass mapping.

2.5 Purification des formes de GAPDH cytosolique et associée à la paroi de *L. plantarum* 299v

Les formes de GAPDH intracellulaire et associée à la paroi de *L. plantarum* 299v sont purifiées à température ambiante en une seule étape par chromatographie de pseudo-affinité. La phase stationnaire est greffée avec le ligand bleu cibacron F3G-A (GE Healthcare).

Les protéines associées à la paroi de la bactérie sont extraites comme décrit précédemment. L'extrait est ensuite concentré dix fois par ultrafiltration à l'aide d'une cellule Amicon (Millipore, Bedford, USA) équipée d'une membrane en cellulose régénérée dont le seuil de coupure est de 10 kDa (Millipore). La pression transmembranaire est fixée à 1,5 bar. L'extrait concentré est diafiltré par une série de

dilutions/concentrations réalisée à 4°C avec du tampon NH_4HCO_3 25 mM pH 7,5 contenant de l'EDTA 5 mM, du PMSF 1 mM et du DTT 5 mM (Tampon A). L'extrait concentré et diafiltré est ensuite additionné de sulfate d'ammonium à 85% de saturation. La suspension est placée à 4°C pendant 18h. Après centrifugation à 16000 rpm, le précipité est solubilisé dans 4 mL de tampon A, puis dialysé une nuit à 4 °C contre ce même tampon.

La forme intracellulaire de GAPDH a été extraite à partir des culots bactériens lysés dans le tampon A, à l'aide d'un broyeur à microbilles (Mini-BeadbeaterTM, Biospec Products). Les corps bactériens non lysés sont éliminés par centrifugation à 3500 rpm pendant 15 min à 4°C, et les protéines cytosoliques présentes dans le surnageant sont précipitées au sulfate d'ammonium puis traitées comme cité ci-dessus.

Les extraits dialysés de protéines intracellulaires et de paroi sont déposés sur une colonne (5 ml) « Fast Flow blue Sepharose CL 6B » (GE Healthcare). Le débit d'élution est fixé à 2 mL/min. L'absorbance de l'éluat est mesurée en continu à 280 nm (Déecteur UV Waters 486). Les protéines présentant de l'affinité pour la phase stationnaire sont ensuite éluées avec un gradient linéaire de 0 à 10 mM de NAD dans le tampon A. Des fractions d'éluat de 2 mL sont collectées et analysées sur la base de leur contenu en protéines et en activité GAPDH. Les fractions contenant l'activité GAPDH sont rassemblées. La pureté est contrôlée par SDS-PAGE.

2.6 Analyse comparée des structures primaires des deux formes de GAPDH

Les masses moléculaires des formes purifiées de GAPDH, cytosolique et associée à la paroi, sont estimées par spectrométrie de masse en mode LC ESI-SM/SM (ThermoFischer). Les deux formes de GAPDH sont séparées par chromatographie liquide haute performance en phase inversée sur colonne C4 (150 x 2,1 mm, Vydac). Avant injection sur la colonne C4, les préparations de GAPDH purifiées sont dialysées contre un tampon NH_4HCO_3 25 mM, pH 8,8. La sortie de la colonne est connectée directement à la source nanospray d'un spectromètre de masse LCQ Advantage ion trap.

La structure primaire de chacune des deux formes purifiées de GAPDH est déterminée par spectrométrie de masse en mode LC ESI-MS/MS. Les deux formes de GAPDH sont soumises à une protéolyse trypsique. Les peptides tryptiques correspondant à chaque forme de GAPDH sont séparés par HPLC en phase inversée sur une colonne capillaire C 18 (150 x 2,1 mm, Vydac) à un débit de 0,2 mL/min. Les

peptides élués sont introduits directement dans la source nanospray du spectromètre de masse LCQ Advantage ion trap.

2.7 Mesure de l'activité GAPDH

Un test d'activité GAPDH est mis en œuvre pour établir la présence d'une forme active de GAPDH associée à la paroi de *L. plantarum* 299v.

Le culot issu de la centrifugation de 1 mL de culture de *L. plantarum* 299v, est lavé deux fois avec du tampon phosphate-citrate, pH 5,0 puis re-suspendu dans un volume final de 1 mL de tampon triéthanolamine 40 mM, Na₂HPO₄ 50 mM, EDTA 5 mM, dithiothreitol 0,1 mM, pH 8,6, en présence de 7 µL de glycéraldéhyde-3-Phosphate (49 mg/mL) additionnés de 100 µL d'une solution de NAD à 10 mM. Le mélange réactionnel est incubé pendant 4 min à température ambiante. Les corps bactériens sont ensuite éliminés par centrifugation à 8000 rpm pendant 1 min et l'activité GAPDH est mesurée dans le surnageant par suivi de l'absorbance à 340 nm (Ferdinand, 1964). L'activité GAPDH liée à la présence d'une forme libre de l'enzyme dans le surnageant de culture est contrôlée à chaque étape de la croissance de la bactérie. Une unité d'activité enzymatique (U) correspond à la quantité d'enzyme qui libère 1 µmole de NADH, H⁺ par min dans les conditions du test.

2.8 Estimation de la masse moléculaire des formes natives de GAPDH pariétale et intracellulaire

La masse moléculaire de chacune des deux formes de GAPDH, est estimée par filtration moléculaire sur gel. Environ 125 µg de chaque forme de GAPDH purifiée sont solubilisés dans 0,5 mL de tampon NH₄HCO₃ 25 mM, pH 7,5 contenant du DTT 5 mM, de l'EDTA 5 mM, du PMSF 1 mM et du NAD 10 mM, puis déposés sur une colonne Superdex 200 (10/300 mm, Tricorn, GE Healthcare). La phase stationnaire est élue à un débit de 0,5 mL/min avec le même tampon dépourvu de NAD. L'éluat est collecté par fraction de 0,5 mL. La détection est réalisée à 280 nm. Chaque fraction est caractérisée sur la base de son contenu en GAPDH par la mesure de son activité enzymatique. La masse moléculaire des deux formes de GAPDH est estimée grâce à une courbe d'étalonnage établie à l'aide du mélange de marqueurs : thyroglobuline (669 kDa), apoferritine (440 kDa), β-amylase (200 kDa), albumine sérique bovine (67 kDa), anhydrase carbonique (29 kDa), le cytochrome C (12400 Da) et aprotinine (6500 Da).

2.9 Production d'anticorps polyclonaux anti GAPDH

Des anticorps polyclonaux de la GAPDH associée à la paroi de *L. plantarum* 299v ont été produits chez le lapin (Proteogenix, Valparc, France). Un lapin mâle (race New Zelande) est immunisé avec 2 mg de la forme purifiée de GAPDH associée à la paroi de *L. plantarum* 299v. Après 90 jours d'immunisation, le lapin est sacrifié et le sérum est récupéré. Les anticorps anti-GAPDH sont ensuite purifiés par chromatographie d'affinité sur protéine A et leur réactivité est testée par la méthode ELISA à une dilution de 1:65000.

2.10 Localisation de la GAPDH associée à la paroi de *L. plantarum* 299v

La localisation de la GAPDH au niveau de la paroi de *L. plantarum* 299v est établie par immunofluorescence. Des cellules de *L. plantarum* 299v collectées en phase stationnaire (10^9 UFC/mL) sont lavées soit avec un tampon PBS à pH 7,5 soit avec un tampon phosphate-citrate à pH 5,0. 20 μ L de la suspension cellulaire sont déposés sur des lames en verre, fixés à la flamme puis avec une solution de paraformaldéhyde à 3,5% (p/v) pendant 15 min à température ambiante. Les lames sont ensuite lavées deux fois par un tampon PBS puis incubées 30 min à 37°C avec les anticorps anti-GAPDH préalablement dilués au 1:50 dans du tampon PBS. Après incubation, les lames sont lavées trois fois 10 min avec du tampon PBS, incubées de nouveau 30 min à 37°C avec des anticorps anti-IgG de lapin, couplés au fluorochrome Alexa-488 (Molecular probes, Invitrogen). Les anticorps secondaires sont préalablement dilués au 1:100 dans du tampon PBS. Les lames sont ensuite lavées trois fois 10 min avec du tampon PBS puis observées à l'aide d'un microscope confocale (Zeiss).

2.11 Lyse cellulaire provoquée et suivi de la localisation de la GAPDH

5 mL d'une culture de *L. plantarum* 299v en début de phase stationnaire (12h) sont incubés 15, 30 et 60 min à 37 °C en présence de 0,4 U/mL de GAPDH intracellulaire extraite par lyse mécanique d'une fraction de la même culture. Après atteinte de la durée d'incubation, 1 mL de la culture est centrifugé 5 min à 3500 rpm et les cellules collectées sont lavées deux fois par un tampon phosphate-citrate, pH 5,0. Les activités GAPDH résiduelles sont mesurées à la fois dans le surnageant et à la surface des cellules bactériennes. L'activité de la GAPDH associée à

la paroi bactérienne et celle présente à l'état libre dans le milieu de culture, sont également contrôlées avant la simulation de la lyse bactérienne. Une numération des cellules bactériennes est réalisée sur milieu gélosé MRS à l'issue de chaque phase d'incubation.

2.12 Analyse par cytométrie en flux (CMF) et marquage fluorescent des cellules de *L. plantarum* 299v

La cytométrie en flux est mise en œuvre pour suivre conjointement l'évolution de la perméabilité membranaire et celle de l'activité métabolique des cellules bactériennes à différents temps de croissance. Deux fluorochromes sont sélectionnés : l'Iodure de Propidium ou IP pour mettre en évidence l'altération de la perméabilité membranaire et la Fluorescéine DiAcétate ou FDA pour la mesure de l'activité métabolique.

Les cellules de *L. plantarum* 299v prélevées à différents stades de la croissance : 9h, 12h, 16h, 20h, 24h et 48h, sont lavées deux fois par du tampon phosphate-citrate, pH 5,0 puis resuspendues dans ce même tampon à une concentration finale de 10^6 UFC/mL. La FDA est ajoutée à une concentration finale de 10 µg/mL puis la suspension est incubée pendant 15 min à 30°C. L'IP est additionné à une concentration finale de 25 µg/mL, avant l'analyse par cytométrie en flux (Shapiro, 2008).

Les cellules de *L. plantarum* 299v sont également soumises à un double marquage par l'IP et par les anticorps anti-GAPDH. Des culots cellulaires issus de 1 mL de culture de *L. plantarum* 299v en phase stationnaire de croissance (T 24h) sont lavés deux fois par un tampon phosphate-citrate, pH 5,0 puis incubés pendant 30 min à température ambiante avec des anticorps anti-GAPDH dilués au 1 :50 dans ce même tampon. Les cellules sont ensuite lavées deux fois puis incubées pendant 30 min à température ambiante avec des anticorps anti-IgG de lapin, couplés à l'Alexa-488. Après deux lavages des cellules par un tampon phosphate-citrate, pH 5,0, les cellules sont marquées à l'IP avant l'analyse par cytométrie en flux dans les conditions décrites dans la section précédente. La fluorescence verte est mesurée à 530 ± 15 nm (Alexa-488, FL1) et la fluorescence rouge à 610 nm (Iodure de Propidium, FL3).

Toutes les mesures sont réalisées à l'aide d'un cytomètre en flux Facs Vantage Diva SE (Becton Dickinson, USA) à une longueur d'onde d'excitation de 488 nm, en utilisant un laser Argon de 25 mW. Les cellules sont aspirées à un débit de 5000 cellules/sec dans un capillaire de 70 µm de diamètre. Pour chaque essai au moins 10^5 cellules sont analysées. La fluorescence verte (fluorescéine, FL1) est mesurée à une

longueur d'onde de 530 ± 15 nm et la fluorescence rouge (iodure de propidium, FL3) est enregistrée à 610 nm. L'utilisation d'échantillons marqués indépendamment par chaque marqueur permet de compenser électroniquement les chevauchements de fluorescence entre chaque signal. Les résultats sont traités à l'aide du logiciel Cell Quest Pro (Becton Dickinson, USA).

2.13 Etude statistique

Les analyses statistiques de toutes les données ont été effectuées à l'aide du test Student et reportées comme une moyenne \pm la déviation standard (SD).

3. Résultats

3.1. Identification et caractérisation de la GAPDH associée à la paroi de *L. plantarum* 299v

Les protéines extraites de la paroi de *L. plantarum* 299v par le tampon Tris-HCl 100 mM, pH 8,0, sont analysées par SDS-PAGE (**Fig. 1a**). Six bandes de protéines majoritaires (Fig. 1a, ligne 1) sont excisées du gel, protéolysées par la trypsin et les peptides résultant sont analysés par spectrométrie de masse en mode MALDI-TOF.

Les protéines identifiées correspondent à des protéines précédemment caractérisées à la surface de diverses espèces bactériennes. Parmi elles on retrouve la protéine chaperonne CLPB (bande 1), le facteur d'élongation G (bande 2), protéine chaperonne DnaK (HSP70) (bande 3), chaperonine GroEL (bande 4), l'Enolase (bande 5) et la GAPDH (bande 6).

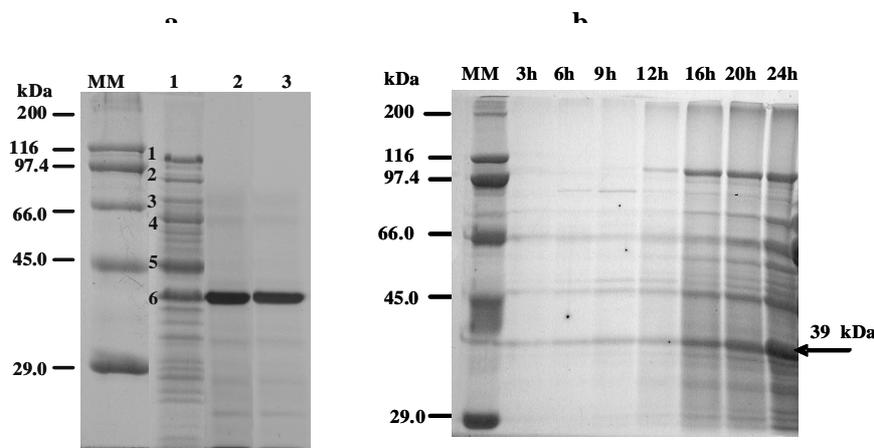


Fig.1. Analyse SDS-PAGE des protéines extraites de la paroi de *L. plantarum* 299v. (a) Purification des formes de GAPDH intracellulaire et associée à la paroi. MM, marqueurs de masses moléculaires ; ligne 1, extrait des protéines désorbées de la paroi de *L. plantarum* 299v (25 μ g) ; ligne 2 et 3, formes purifiées de GAPDH associée à la paroi et cytosolique. (b) Analyses SDS-PAGE des protéines désorbées à pH 8 de la paroi de *L. plantarum* 299v, à différents stades de la croissance de la bactérie. Les protéines sont révélées par coloration au bleu de coomassie G-250.

Les formes de GAPDH intracellulaire et associée à la paroi de *L. plantarum* 299v sont purifiées en une seule étape de chromatographie de pseudo-affinité sur colonne blue-Sepharose CL6B (GE Healthcare). Les fractions éluées présentant une activité GAPDH sont rassemblées, concentrées par ultrafiltration puis analysées par SDS-PAGE. L'électrophorégramme (Fig. 1a, ligne 2 et 3), révèle la présence d'une seule bande de masse moléculaire estimée à 39 kDa, quelle que soit l'origine de l'extrait protéique purifié.

Les activités spécifiques de chacune des deux formes de GAPDH purifiées ont été mesurées. Les valeurs expérimentales sont de 20 ± 2 U/mg et 10 ± 2 U/mg respectivement pour les GAPDH pariétale et cytoplasmique.

Les masses moléculaires des deux formes de GAPDH à l'état monomérique ont été déterminées. Ceci a été réalisé par HPLC en phase inversée sur colonne C4 couplée à un spectromètre de masse en mode Electrospray (LC/ESI/MS). Les profils chromatographiques obtenus sont similaires et les masses mesurées par SM sont identiques pour les formes cytosolique et pariétale. Chacune des deux formes coexiste sous deux

états, l'un avec un résidu méthionine en position N terminale (masse moléculaire moyenne 36438 Da, calculée sur la base de l'entrée SwissProt Q88YH6) et l'autre sans (masse calculée 36307 Da). Cette modification est attribuable à un clivage du résidu Met par une méthionine aminopeptidase (Hirel *et al.*, 1989) . Les masses moléculaires mesurées par LC/ESI/MS sont en accord avec celles calculées sur la base de la séquence du gène :

- 36430 et 36436 \pm 10 Da respectivement pour les formes cytoplasmique et liée à la paroi, présentant un résidu méthionine en position N-terminale.
- 36306 et 36312 \pm 10 Da pour les formes sans méthionine.

Une telle observation nous permet de conclure d'une part sur l'identité structurale entre les formes pariétale et cytoplasmique de GAPDH et d'autre part sur l'absence de modification post-traductionnelle.

Pour compléter l'étude, les cartes tryptiques des deux formes de GAPDH ont été établies. Les profils chromatographiques des peptides tryptiques séparés sur colonne C18 sont similaires et les masses de chaque peptide issu des deux formes de l'enzyme, mesurées par ESI/SM, révèlent une totale homologie. La distribution des peptides identifiés couvre l'ensemble de la séquence.

Nous avons ensuite comparé les masses moléculaires des deux formes de GAPDH à l'état oligomérique. L'analyse est réalisée par filtration moléculaire sur gel superdex 200. Les profils chromatographiques sont superposables et témoignent de masses moléculaires identiques estimées à 148 kDa sur la base de la courbe d'étalonnage de la colonne. Ces résultats rendent compte d'un état tétramérique des formes actives de GAPDH intracellulaire et associée à la paroi. Par ailleurs, cette masse mesurée est en accord avec celle calculée pour un tétramère en utilisant les données ESI-SM précédentes ($4 \times 36436 = 145.7$ kDa). Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Fothergill-Gilmore *et al.* (1993), où les auteurs ont indiqué que la GAPDH cytosolique a été remarquablement conservée au cours de l'évolution, et présente une structure homotétramérique composée de sous-unité d'environ 35-37 kDa.

3.2. Localisation de la GAPDH associée à la paroi de *L. plantarum* 299v

La localisation de la GAPDH au niveau de la paroi de Lp 299v est établie par immunofluorescence. Les cellules de Lp 299v sont lavées à pH 7,5 ou 4,5 puis marquées par des anticorps anti-GAPDH fluorescents et observées par microscopie confocale (**Fig. 2a**). L'association de la GAPDH à la paroi est pH dépendante, l'enzyme est désorbée de la paroi à

pH 7,5. Les résultats sont en accord avec ceux rapportés Antikainen *et al.*, (2007) pour la GAPDH de *L. crispatus* ST1. Ces résultats sont confirmés par une chute d'environ 90% de l'activité GAPDH associée à la paroi dans les mêmes conditions (**Fig. 2b**). Lorsque la solution de protéines désorbées de la paroi est réajustée à pH acide, puis remise en contact avec les cellules de Lp 299v, nous observons une réassociation de la GAPDH pouvant atteindre 70% (**Fig. 2b**). Ceci témoigne du caractère réversible de l'association de l'enzyme à la paroi.

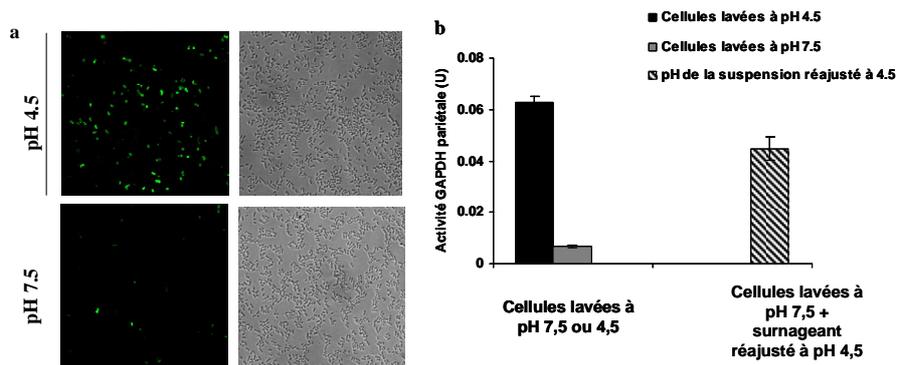


Fig. 2. Localisation de la GAPDH associée à la paroi de *L. plantarum* 299v, par immunofluorescence indirecte. (a) Les cellules de *L.p* 299v sont lavées soit au tampon PBS, pH 7,4 soit au tampon phosphate-citrate, pH 4,5 puis marquées par le complexe anticorps anti-GAPDH/anti-IgG couplés à l'Alexa-488 (à gauche), les bactéries sont observées en microscopie confocale. Les images en contraste de phase sont présentées sur la droite. (b) Mesure de l'activité GAPDH *in situ* à la surface des cellules de *L. plantarum* 299v. L'activité GAPDH pariétale est quantifiée après lavage à pH 7,5 ou pH 4,5 (à gauche). L'extrait désorbé de la surface de *L. plantarum* 299v à pH 7,5 est à nouveau ajusté à pH 4,5 puis remis en contact avec les bactéries (à droite).

3.3. Etude de l'exportation de la GAPDH vers la paroi de *L. plantarum* 299v

a) Evolution de la concentration de la GAPDH associée à la paroi, en fonction de la phase de croissance

L'évolution de la concentration de la GAPDH pariétale, du pH, de la population bactérienne (exprimée en UFC/mL) ont été contrôlés au cours de la croissance de la bactérie. L'évolution de la teneur résiduelle du milieu de culture en glucose a été également quantifiée par HPLC sur

colonne Aminex HPX87 (Biorad) selon la méthode adaptée de Morales *et al.*, (1998). L'activité de l'enzyme associée à la paroi semble dépendante de la phase de culture sur milieu MRS. On observe un accroissement d'un facteur 3 durant la phase exponentielle suivi d'une très forte augmentation d'environ 23 fois pendant la phase stationnaire (**Tableau 1**). Il est à noter que la forte augmentation de l'activité GAPDH associée à la paroi en phase stationnaire est corrélable à une baisse de la teneur résiduelle en glucose du milieu de culture MRS. Ce niveau élevé de l'activité GAPDH n'est pas attribuable à une diffusion du substrat (G-3-P) dans le milieu intracellulaire de la bactérie pendant le dosage, car cette augmentation n'a pas été observée lorsque les cellules bactériennes sont lavées avec du tampon PBS, pH 7,4 préalablement à la mesure de l'activité.

Cette augmentation de la concentration de la GAPDH pariétale au cours de la croissance est confirmée par l'analyse électrophorétique des protéines extraites de la surface bactérienne (**Fig. 1b**). L'enzyme n'est pas présente dans le surnageant de culture et ceci quelle que soit la phase considérée (**Tableau 1**).

*ND : non déterminable

Temps (h)	DO ₆₀₀ nm	UFC/mL	Glucose (g/l)	pH	Activité GAPDH associée à la paroi (U/CFU)	*GAPDH libérée (U/mL)
3	0,38	$(5,30 \pm 0,50) \times 10^8$	$15,73 \pm 1,32$	5,86	$(11,30 \pm 1,93) \times 10^{-13}$	ND
6	3,98	$(2,80 \pm 0,10) \times 10^9$	$12,07 \pm 1,02$	4,58	$(12,90 \pm 0,97) \times 10^{-13}$	ND
9	6,62	$(6,40 \pm 1,15) \times 10^9$	$5,58 \pm 0,21$	4,07	$(18,90 \pm 3,63) \times 10^{-13}$	ND
12	8,69	$(9,00 \pm 1,30) \times 10^9$	$2,5 \pm 0,12$	3,86	$(33,60 \pm 4,91) \times 10^{-13}$	ND
16	8,8	$(7,10 \pm 0,73) \times 10^9$	$2,50 \pm 0,10$	3,82	$(40,40 \pm 4,59) \times 10^{-13}$	ND
20	8,2	$(5,50 \pm 1,22) \times 10^9$	$2,20 \pm 0,11$	3,79	$(10,60 \pm 2,41) \times 10^{-12}$	ND
24	8,14	$(3,46 \pm 0,55) \times 10^9$	$2,04 \pm 0,09$	3,75	$(9,13 \pm 1,46) \times 10^{-11}$	ND

Tableau 1: Evolution de l'activité GAPDH et de certains paramètres culturels durant la croissance de *Lp 299v*.

Par ailleurs, la capacité de la GAPDH cytosolique à se réassocier à la paroi consécutivement à sa libération dans le milieu de culture lors de l'autolyse bactérienne a été étudiée. Afin de vérifier la validité de cette hypothèse, nous avons provoqué une lyse cellulaire d'une culture de *Lp 299v* à 12h de croissance. L'ajout de la GAPDH issue de cette lyse bactérienne, à une culture de *Lp 299v* au même stade de croissance ne se traduit par un accroissement concomitant de l'enzyme au niveau de la paroi (**Fig. 3**). Après une heure d'incubation avec la culture bactérienne à 37°C, l'enzyme en solution dans le milieu de culture perd environ 90% de son activité initiale. De plus, ce taux d'inactivation de l'activité

GAPDH est identique lorsque celle-ci a été rajoutée à un surnageant de culture à T12h.

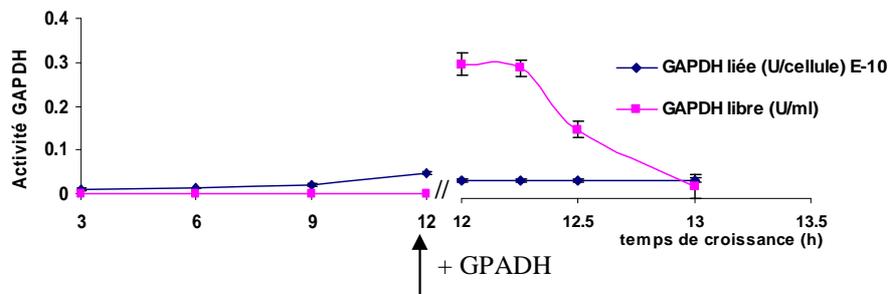


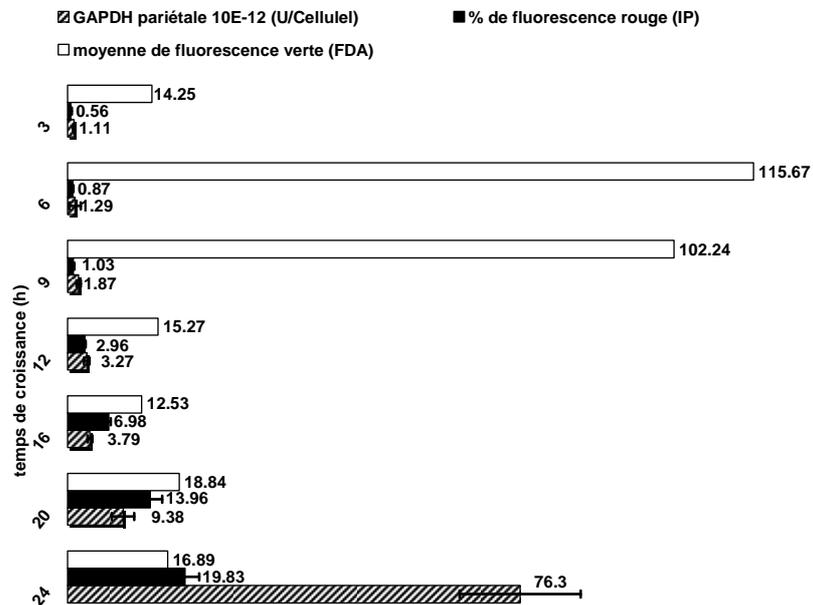
Fig. 3. Evolution des activités GAPDH associée à la paroi et en solution dans le milieu de culture, après addition de GAPDH cytoplasmique à une culture de *Lp 299v* en début de phase stationnaire. (-♦-) activité de la GAPDH associée à la paroi de *Lp 299v*, (-■-) activité GAPDH libre dans le surnageant de culture.

Ces observations ont amené à rechercher d'autres événements physiologiques qui pourraient être à l'origine de l'exportation de la GAPDH vers la paroi.

b) Evolution de la perméabilité membranaire et de la concentration de la GAPDH pariétale au cours de la croissance

La technique de cytométrie en flux (CMF) est utilisée afin de suivre deux paramètres cellulaires : la perméabilité membranaire et l'activité métabolique des cellules bactériennes à différents stades de la croissance. Deux fluorochromes ont été utilisés : l'Iodure de Propidium ou IP qui pénètre uniquement dans les cellules ayant perdu leur intégrité membranaire et la Fluoresceine DiAcétate ou FDA pour la mesure de l'activité métabolique des cellules. L'hydrolyse de ce marqueur par des estérases cytosoliques, libère de la fluoresceine, un composé ionisé à fluorescence verte qui reste séquestré dans les cellules dont les membranes sont intègres. La proportion de cellules possédant une membrane plasmique altérée ainsi que la concentration de la GAPDH associée à la paroi augmentent progressivement entre la phase exponentielle (9h) et la phase stationnaire (24 h) (**Fig. 4**).

a



b

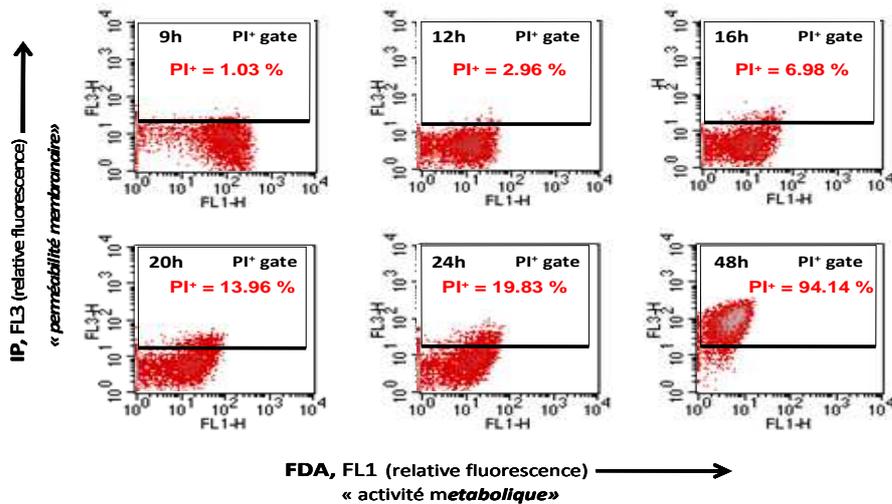


Fig. 4 : (a) Evolution de l'activité GAPDH associée à la paroi de *L. plantarum* 299v, exprimée en U/Cellule, de la perméabilité membranaire (% de la fluorescence rouge, IP) et de l'activité métabolique (fluorescence verte moyenne, FDA) à différentes étapes de la croissance. Les essais ont été réalisés en triplicat, les barres d'erreurs indiquent l'écart type.

(b) Cytogrammes illustrant la bi-analyse paramétrique de l'activité métabolique et de l'intégrité membranaire pendant la croissance de *L. plantarum* 299v, après marquage par l'IP (FL3) et par la FDA (FL1).

L'activité métabolique évolue quant à elle différemment, elle est très importante en phase exponentielle puis chute et reste à une valeur constante pendant la phase stationnaire. Les cytochromes dont sont issus les résultats de la **Fig.4a** illustrant l'évolution de la perméabilité membranaire (FL1) et de l'activité métabolique (FL3) indiquent que les cellules de Lp 299v dont la membrane plasmique est altérée (sous-population IP⁺) semblent conserver une certaine activité métabolique entre le début et la fin de phase stationnaire (de 12h à 24h) contrairement aux cellules à 48h de croissance qui ont totalement perdu leur activité métabolique et leur intégrité membranaire.

c) Corrélation entre la perte d'intégrité de la membrane plasmique de *L. plantarum* 299v et la présence de la GAPDH associée à la paroi

Les anticorps anti-GAPDH ont été utilisés pour suivre l'évolution de l'apparition de la GAPDH associée à la paroi au cours de la croissance de la bactérie. Les cellules de Lp 299v ont été soumises à un double marquage par des anticorps anti-GAPDH fluorescent et par l'IP puis analysé par CMF (**Fig. 5**). L'analyse CMF révèle deux sous-populations cellulaires, l'une possédant une membrane endommagée, notée IP⁺ et l'autre présentant une membrane intègre, notée IP⁻ (**Fig. 5a**). La concentration en GAPDH associée à la paroi est 5 fois supérieure à la surface des cellules ayant perdu leur intégrité membranaire (sous-population IP⁺), comparativement à celle mesurée pour la sous population IP⁻. Ces observations prouvent que la concentration de la GAPDH pariétale est significativement plus élevée sur les parois des cellules dont la membrane plasmique est altérée. Ces résultats sont en accord avec l'augmentation de la concentration et de l'activité GAPDH précédemment observée sur les cellules de *L. plantarum* 299v prélevées au cours de la phase stationnaire (**Fig. 1b et 4a**).

d) Stress nutritionnel et localisation de la GAPDH associée à la paroi

La perte de l'intégrité membranaire et l'accroissement de la concentration en GAPDH pariétale se manifestent principalement en phase stationnaire, lorsque la disponibilité de la source carbonée devient très faible. Aussi nous avons essayé d'établir une corrélation entre ces différents événements.

La culture de Lp 299v sur milieu MRS est complétée en glucose à différentes phases de la croissance. Le glucose est ajouté soit en une seule fois en fin de phase exponentielle (T 9h), soit en deux fois successives après 9h et 12h de culture, à une concentration finale de 20.

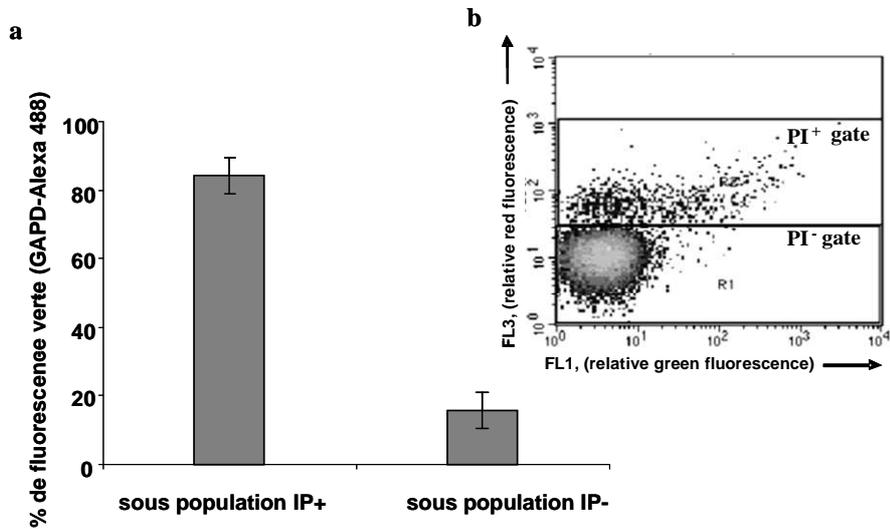


Fig. 5 : Relation entre l'intégrité de la membrane plasmique et la concentration en GAPDH associée à la paroi de *Lp 299v*. (a) Diagramme établissant la corrélation entre la concentration de la GAPDH associée à la paroi (fluorescence verte) et le taux d'altération de la membrane plasmique (sous populations IP⁻ et IP⁺). (b) Cytogramme de la fluorescence verte (FL1, Alexa-488) en fonction de la fluorescence rouge (FL3, IP).

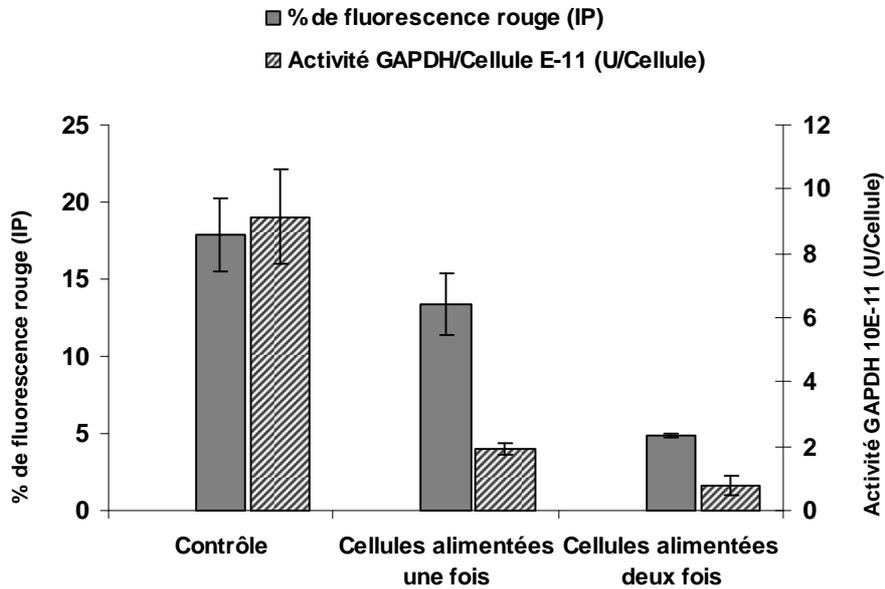


Fig. 6 : Effet de la disponibilité en source carbonée sur la concentration en GAPDH associée à la paroi et sur la perméabilité de la membrane plasmique des cellules de *Lp 299v*.

g/L. L'activité GAPDH pariétale, le dénombrement de la population bactérienne (exprimé en UFC/ml), et la perméabilité membranaire ont été évalués après 24h de croissance.

Quel que soit le nombre d'apport en glucose, on observe le même effet sur la croissance, soit une augmentation d'un facteur 1,65 de la population bactérienne après 24h de culture, comparativement au témoin. L'activité GAPDH quant à elle diminue significativement d'un facteur 12 quand la culture est supplémentée deux fois en glucose (**Fig. 6**). De même, la proportion des cellules dont la membrane plasmique est endommagée est réduite de 30 et 70% lorsque la culture de Lp 299v est complémentée une ou deux fois en glucose.

4. Discussion

Six protéines majoritaires ont été identifiées au cours de cette étude des constituants de surface de la bactérie probiotique *L. plantarum* 299v. Les protéines identifiées présentent toutes une double localisation, à la fois dans le cytoplasme et à la surface de la bactérie. Ces protéines possèdent un pHi acide et sont faiblement liées à la paroi de *L. plantarum* 299v. Elles sont facilement désorbées de la paroi à pH faiblement alcalin supérieur à 7,5. Parmi ces protéines, on retrouve la GAPDH et l'énolase appartenant à la famille des « housekeeping enzymes » (Pancholi and Chhatwal, 2003) et déjà connues pour être impliquées dans une variété de fonctions indépendantes de leur activité catalytique. L'analyse par SDS-PAGE des protéines désorbées de la paroi de *L. plantarum* 299v à pH faiblement alcalin indique que la présence de protéines appartenant à différentes catégories fonctionnelles dont les concentrations évoluent au cours de la croissance de la bactérie. Cette observation est en accord avec celle rapportée par Kelly *et al.* (2005) sur les protéines extraites de la paroi de *L. salivarius*. Les auteurs ont observé une augmentation de la concentration d'une bande protéique de masse moléculaire estimée à 84 kDa, regroupant trois anchorless protein : la protéine chaperonne DnaK, le facteur EF-Ts et la pyruvate kinase, et ceci entre la phase exponentielle et la fin de la phase stationnaire.

De nombreuses protéines d'origine cytoplasmique ont été identifiées à la surface de diverses espèces bactériennes. Cependant, les mécanismes impliqués dans leur exportation vers la paroi restent inconnus. Ces protéines ne contiennent ni séquence signale, ni motif d'ancrage à la paroi. Des auteurs ont suggéré que certaines de ces protéines peuvent se réassocier à la paroi cellulaire après leur sécrétion dans le milieu de culture au cours de la croissance du microorganisme (Bergmann *et al.*, 2001 ; Chhatwal, 2002).

Afin d'apporter une contribution à la compréhension de la double localisation de l'enzyme, nous avons concentré l'essentiel de notre approche à l'étude de l'efflux de la GAPDH cytosolique vers la paroi de *L. plantarum* 299v. Dans un premier temps, nous avons établi l'identité des formes de GAPDH intracellulaire et associée à la paroi de *L. plantarum* 299v. Aucune modification post-traductionnelles n'a été détectée pour la forme de GAPDH associée à la paroi. De toute évidence, nous pouvons conclure que la GAPDH est incorporée à la paroi de *L. plantarum* 299v sous sa forme native cytosolique. De plus, une augmentation de la concentration de la GAPDH associée à la paroi a été confirmée à la fois par l'analyse de l'activité enzymatique et par l'analyse par SDS-PAGE des protéines désorbées de la paroi de *L. plantarum* 299v. L'activité GAPDH pariétale augmente graduellement durant la croissance du probiotique avec une augmentation remarquable pendant la phase stationnaire. L'enzyme n'est pas présente dans le surnageant de culture quelle que soit la phase de croissance considérée.

Par ailleurs, nous rapportons dans cette étude que l'ajout de GAPDH cytosolique, obtenue par lyse cellulaire provoquée, à une culture de *L. plantarum* 299v en début de phase stationnaire, ne se traduit par un accroissement de l'enzyme au niveau de la paroi. Après avoir démontré que l'hypothèse de la réassociation de GAPDH à la paroi consécutivement à sa libération dans le milieu de culture lors de l'autolyse bactérienne est peu probable, nous avons recherché des événements physiologiques qui pourraient être à l'origine de l'exportation de la GAPDH vers la paroi. En combinant l'analyse par cytométrie en flux et la mesure de l'activité GAPDH associée à la paroi, nous avons démontré pour la première fois l'existence d'un lien entre l'augmentation de la concentration de la GAPDH pariétale et la proportion des cellules à membranes plasmique endommagées. En effet, à pH acide, inférieur à son pHi (pHi théorique 5,3), la GAPDH possédant une charge nette positive peut se lier au cours de son efflux à travers la membrane plasmique, à des composés de la paroi chargés négativement tels les acides téichoïques ou lipotéichoïques (Antikainen *et al.*, 2007).

Le double marquage des cellules de *L. plantarum* 299v, durant la phase stationnaire, par des anticorps anti-GAPDH fluorescents et par l'iodure de propidium (IP) a confirmé que les cellules possédant une membrane plasmique endommagée présentent une forte concentration en GAPDH pariétale. Il est à noter que l'intensité de la fluorescence verte observée après marquage de la GAPDH associée à la paroi, est probablement sous-estimée en raison de l'encombrement stérique empêchant une bonne accessibilité des anticorps anti-GAPDH et provoquant ainsi une perte des anticorps anti-GAPDH au cours des nombreuses étapes de lavage. La supplémentation en glucose de la culture en milieu MRS, dès la phase exponentielle, retarde conjointement

l'altération de l'intégrité de la membrane plasmique et l'augmentation de la concentration en GAPDH pariétale. L'altération de la perméabilité membranaire, l'augmentation de la concentration de l'enzyme au niveau de la paroi et la disponibilité en source carbonée sont des paramètres interdépendants. L'association de la GAPDH à la paroi de *S. cerevisiae* et de *C. albicans* avait déjà été corrélée à un stress nutritionnel et/ ou thermique (Delgado *et al.*, 2003 ; Gil *et al.*, 2001). Toutefois, les auteurs se limitent à un constat et ne font état d'aucune investigation quant à l'existence d'un éventuel lien entre l'altération de la perméabilité membranaire des cellules de levures et la variation de l'activité de l'enzyme associée à leur paroi. En effet, la complémentation en glucose d'une culture sur milieu MRS, en phase exponentielle et en début de phase stationnaire, a eu un effet protecteur significatif sur l'intégrité de la membrane plasmique des cellules de *L. plantarum* 299v, et une diminution concomitante de l'activité GAPDH a été également observée. Toutefois, des investigations supplémentaires sont nécessaires pour établir une relation directe entre les effets physiologiques du stress nutritionnel sur l'intégrité des membranes plasmiques d'une part et sur l'efflux et le piégeage de la GAPDH d'autre part.

En conclusion, Cette étude a permis de proposer un mécanisme potentiel d'exportation de la GAPDH et probablement d'autres « anchorless proteins » à la surface de *L. plantarum* 299v. L'homologie totale observée entre les formes de GAPDH cytoplasmique et associée à la paroi nous a permis de conclure sur l'absence de modification structurale consécutive à l'exportation de la protéine intracellulaire vers la surface bactérienne. La perte de l'intégrité de la membrane plasmique est étroitement liée à l'efflux et la localisation de la GAPDH à la surface de la bactérie. Le rôle fonctionnel de ces protéines associées à la surface de la bactérie doit être clarifié, même si elles sont vraisemblablement impliquées dans des interactions bactérie/hôte. En outre, la publication du sécrétôme de *L. plantarum* (Boekhorst *et al.*, 2006), nous incite à poursuivre notre étude sur l'identification et la caractérisation systématique des composants de la paroi bactérienne. Cette approche génétique/ biochimique pourrait apporter une contribution à l'élucidation des mécanismes complexes de l'interaction probiotique/ hôte.

5. Bibliographie

Antikainen, J., V. Kuparinen, K. Lähtenmäki, and T. K. Korhonen. 2007. pH-dependent association of enolase and GAPDH of *Lactobacillus crispatus* with the cell wall and lipoteichoic acids. *J. Bacteriol.* 189: 4539–4543.

Barbosa, M. S., S. N. Bao, P. F. Andreotti, F. P. de Faria, M. S. Felipe, L. dos Santos Feitosa, M. J. Mendes-Giannini, and C. M. Soares. 2006. Glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase of *Paracoccidioides brasiliensis* is a cell surface protein involved in fungal adhesion to extracellular matrix proteins and interaction with cells. *Infect. Immun.* 74: 382- 389

Bergmann, S., M. Rohde, G.S. Chhatwal, and S. Hammerschmidt. 2001. Alpha-enolase of *Streptococcus pneumoniae* is a plasmin(ogen)-binding protein displayed on the bacterial cell surface. *Mol Microbiol.* 40: 1273–1287.

Boekhorst, J., M. Wels, M. Kleerebezem, and R. J. Siezen. 2006. The predicted secretome of *Lactobacillus plantarum* WCFS1 sheds light on interactions with its environment. *Microbiol.* 152: 3175-3183.

Bradford, H.M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal Biochem.* 72: 248-254.

Chhatwal, G.S. 2002. Anchorless adhesins and invasins of Gram-positive bacteria: a new class of virulence factors. *Trends Microbiol.* 10: 205–208.

Delgado, M.L., J. E. O'Connor, I. Azorín, J. Renau-Piqueras, M.L. Gil, and D. Gozalbo. 2001. The glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase polypeptides encoded by the *Saccharomyces cerevisiae* TDH1, TDH2 and TDH3 genes are also cell wall proteins. *Microbiol.* 147: 411-417.

Delgado, M.L., M. L. Gil, D. Gozalbo. 2003. Starvation and temperature upshift cause an increase in the enzymatically cell wall-associated glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase protein in yeast. *FEMS Yeast Res.* 4: 297-303.

de Man J. C., Rogosa M., and Sharpe M. T. 1960. A medium for cultivation of lactobacilli. *J. Appl. Bacteriol.* 23, 130-135.

Egea, L., L. Aguilera, R. Gimenez, M. A. Sorolla, M. A. Aguilar, J., Badia, and L. Baldomaa. 2007. Role of secreted glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase in the infection mechanism of enterohemorrhagic and enteropathogenic *Escherichia coli*: Interaction of the extracellular enzyme with human plasminogen and fibrinogen. *Intern J. Biochem. Cell Biolog.* 39: 1190–1203.

Ferdinand, W. 1964. The isolation and specific activity of rabbit-muscle glyceraldehyde phosphate dehydrogenase. *Biochem J.* 92: 578-585.

- Fothergill-Gilmore, L. A. and P. A. Michels. 1993. Evolution of glycosis. *Prog. Biophys. Mol Biol.* 52: 105-235.
- Gil-Navarro, I., M. L. Gil, M. Casanova, J. O'Connor, J. P. Martinez, and D. Gozalbo. 1997. The glycolytic enzyme glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase of *Candida albicans* is a surface antigen. *J. Bacteriol.* 179: 4992-4999.
- Gil, M. L., M. L. Delgado, and D. Gozalbo. 2001. *Candida albicans* cell wall-associated glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase activity increases in response to starvation and temperature upshift. *Med Mycol.* 39: 387-394.
- Gozalbo, D., I. Gil-Navarro, I. Azorin, J. Renau-Piqueras, J. P. Martinez, and M. L. Gil. 1998. The cell wall-associated glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase of *Candida albicans* is also a fibronectin and laminin binding protein. *Infect. Immun.* 66: 2052– 2059.
- Grifantini, R., E. Bartolini, A. Muzzi, M. Draghi, E. Frigimelica, J. Berger, F. Randazzo, and G. Grandi. 2002. Gene expression profile in *Neisseria meningitidis* and *Neisseria lactamica* upon host-cell contact: from basic research to vaccine development. *Ann N Y Acad Sci.* 975: 202-216
- Hirel, P. H., J. M. Schmitter, P. Dessen, G. Fayat, and S. Blanquet. 1989. Extent of N-terminal methionine excision within *E. coli* proteins is governed by the side chain length of the penultimate amino acid. *Proc Natl Acad Sci (USA).* 86: 8247-8251.
- Hurmalainen, V., S. Edelman, J. Antikainen, M. Baumann, K. Lähteenmäki, and R. K. Korhonen. 2007. Extracellular proteins of *Lactobacillus crispatus* enhance activation of human plasminogen. *Microbiol.* 153: 1112–1122
- Kelly, P., P. B. Maguire, M. Bennett, D. Fitzgerald, R. J. Edwards, B. Thiede, A. Treumann, J. K. Collins, G.C. O'Sullivan, F. Shanahan, and C. Dunne. 2005. Correlation of probiotic *Lactobacillus salivarius* growth phase with its cell wall-associated proteome. *FEMS Microbiol Lett.* 252: 153-159.
- Kinoshita, H., H. Uchida, Y. Kawai, T. Kawasaki, N. Wakahara, H. Matsuo, M. Watanabe, H. Kitazawa, S. Ohnuma, K. Miura, A. Horii, and T. Saito. 2008. Cell surface *Lactobacillus plantarum* LA 318 glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase (GAPDH) adheres to human colonic mucin. *J. Appl Microbiol.* 104: 1667-1674.

- Laemmli, U. K. 1970. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. *Nature*. 227: 680-685.
- Lamonica, J. M., M. Wagner, M. Eschenbrenner, L. E. Williams, T. L. Miller, G. Patra, and V. G. Del-Vecchio. 2005. Comparative secretome analyses of three *Bacillus anthracis* strains with variant plasmid contents. *Infect. Immun.* 73: 3646-3658.
- Ling, E., G. Feldman, M. Portnoi, R. Dagan, K. Overweg, F. Mulholland, V. Chalifa-Caspi, J. Wells, Y. Mizrachi-Nebenzahl. 2004. Glycolytic enzymes associated with the cell surface of *Streptococcus pneumoniae* are antigenic in humans and elicit protective immune responses in the mouse. *Clin Exp. Immunol.* 138: 290–298
- Morales, M. L., A. G. Gonzalez, and A. M. Troncoso. 1998. Ion-exclusion chromatographic determination of organic acids in vinegars. *J. Chromato A.* 822: 45-51.
- Niedzielin, K., H. Kordecki, and B. Birkenfeld. 2001. A controlled, double-blind, randomized study on efficacy of *Lactobacillus plantarum* 299v in patients with irritable bowel syndrome. *Eur J. Gastroenterol. Hepatol.* 13: 1143-7.
- Pancholi V. and V. A. Fischetti. 1992. Major surface protein on group A Streptococci is a glyceraldehyde-3-phosphate-dehydrogenase with multiple binding activity. *J. Exp. Med.* 176: 415-426.
- Pancholi, V., and V.A. Fischetti. 1997. Regulation of the phosphorylation of human pharyngeal cell proteins by group A streptococcal surface dehydrogenase: signal transduction between streptococci and pharyngeal cells. *J. Exp. Med.* 186: 1633–1643
- Pancholi, V., and G.S. Chhatwal. 2003. Housekeeping enzymes as virulence factors for pathogens. *Int J. Med Microbiol.* 293: 391–401.
- Parvez, S, K. A. Malik, S. Ah Kang, and H-Y Kim. 2006. Probiotics and their fermented food products are beneficial for health. *J. Appl Microbiol.* 100: 1171–1185
- Ramiah, K., C. A. Van Reenen, and M. T. Dicks. 2008. Surface-bound proteins of *Lactobacillus plantarum* 423 that contribute to adhesion of Caco-2 cells and their role in competitive exclusion and displacement of *Clostridium sporogenes* and *Enterococcus faecalis*. *Res. Microbiol.* 159: 470-475.

Schaumburg, J., O. Diekmann, P. Hagendorff, S. Bergmann, M. Rohde, S. Hammerschmidt, L. Jänsch, J. Wehland, and U. Kärst. 2004. The cell wall subproteome of *Listeria monocytogenes*. *Proteomics* 4: 2991-3006.

Shapiro, M. H. 2008. Flow cytometry of bacterial membrane potential and permeability. *Method. Molecul Med.* 142: 175-186. In W. Scott Champney (ed), New antibiotic targets. Humana Press Inc., Totowa, NJ.

Villamon, E., V. Villalba, M. Mercedes Noguera, J. M., Tomas, D. Gozalbo, and M. L. 2003. Glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase, a glycolytic enzyme present in the periplasm of *Aeromonas hydrophila*. *Antonie van Leeuwenhoek.* 84: 31–38



Naima SAAD est actuellement ingénieur recherche et développement au sein de la société ID Bio SA, Limoges (87). Docteur en biochimie, elle a réalisé sa thèse à l'antenne IUT du Laboratoire de Chimie des Substances Naturelles EA 1069, sous la direction de Philippe Bressollier, professeur à l'Université de Limoges et a bénéficié d'une Allocation Recherche Innovation et Valorisation cofinancée par la région Limousin et la société ID Bio entre 2006 et 2009. Son

intérêt et sa maîtrise des outils de purification et d'étude structurale des protéines la conduisent à assurer la gestion d'un projet de développement de chromatographie à l'échelle du pilote industriel au sein de la société ID Bio.



Philippe Bressollier est professeur dans le département Génie Biologique de l'IUT du Limousin, U. Limoges (87). Il y enseigne les techniques séparatives (aspects industriels et analytiques). Il est membre du Laboratoire de Chimie des Substances Naturelles, LCSN, EA 1069 et dirige une antenne du laboratoire qu'il a mis en place au sein du Dpt Génie Biologique depuis 1998. La thématique de recherche de l'antenne LCSN, intitulée «Bactéries probiotiques et oligosaccharides prébiotiques»

est menée dans le cadre d'une collaboration établie depuis 2000 avec l'UMR 5248 CBMN CNRS U.Bordeaux-1 ENITAB. Les principaux aspects de la thématique concernent l'identification d'entités moléculaires

(protéines, polysaccharides, acides teichoïques et lipoteichoïques) présentes à la surface de bactéries probiotiques des genres *Lactobacillus* et *Bacillus* et impliquées dans l'interaction du microorganisme avec le tractus intestinal de l'hôte. Les molécules identifiées sont caractérisées sur la base de leur rôle potentiel d'adhésines spécifique et/ou d'éléments modulateurs de la réponse immunitaire chez l'hôte.



Chantal Jayat-Vignoles est maître de conférences à l'Université de Limoges et membre du laboratoire PMRIL (Physiologie Moléculaire de la réponse Immune et des Lymphoproliférations, UMR CNRS 6101). Docteur en biologie cellulaire, ses intérêts de recherche portent sur la lymphomagénèse des cellules B immortalisées par l'EBV. Elle est également responsable adjointe de la plateforme CIM (Cytométrie, Imagerie et Mathématiques) de l'Université de Limoges.



Maria Urdaci a obtenu son doctorat en 1987 à l'Université de Bordeaux et est actuellement professeur de Microbiologie et Biotechnologie à l'ENITA de Bordeaux, école agronomique du Ministère de l'Agriculture où elle enseigne. En 1999, elle crée le laboratoire de Microbiologie. Elle dirige ce laboratoire qui fait partie de l'UMR 5248 CNRS-Univ Bx1-ENITAB actuellement. Après obtention de son Master 2 à l'universidad de Valencia en Espagne, elle a travaillé dans de différents champs de la microbiologie et de la biologie moléculaire et acquis de solides bases scientifiques à l'Institut Pasteur de Paris, entre autres. Mme Urdaci depuis une dizaine d'années réalise ses travaux de recherche dans le domaine des bactéries probiotiques et l'étude de microflores complexes. Elle étudie le mode d'action des souches probiotiques : production de substances antimicrobiennes, adhésion, immunomodulation et le rôle des entités de surface impliqués dans ces mécanismes. Elle a son avoir plus de soixante dix publications scientifiques et 2 brevets. Depuis 2004, elle est expert à l'AFSSA et membre de la CNECA1 depuis 2006. Elle est dans l'édition de la nouvelle revue Probiotics and Antimicrobial Proteins, collabore avec plusieurs entreprises et est partie prenante des pôles de compétitivité Régionaux.



S. Chaignepain,

*Université de Bordeaux, Institut Européen de
Chimie et Biologie (IECB).*



JM. Schmitter,

*Université de Bordeaux, Institut Européen de
Chimie et Biologie (IECB).*

Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs

Mohamed Ansoumane Camara, Pierre-Olivier Logerais, Olivier Riou, Jean-Félix Durastanti

*IUT de Sénart-Fontainebleau – Université Paris Est Créteil (UPEC)
Département Génie Industriel et Maintenance (GIM)
Rue Georges Charpak – 77567 Lieusaint Cedex
mohamedansoumane@yahoo.fr ; pierre-olivier.logerais@u-pec.fr ;
olivier.riou@u-pec.fr ; durastanti@u-pec.fr*

**Section de rattachement : 62
Secteur : Secondaire**

RÉSUMÉ : *Les besoins accrus de production d'électricité photovoltaïque dans des sites isolés nécessitent d'envisager des solutions pour des applications qui requièrent de fortes puissances électriques. Les supercondensateurs, contrairement aux batteries, ont la capacité de fournir des pics de puissance électrique et constituent donc une solution intéressante. Dans le présent travail, le stockage de l'énergie photovoltaïque par des supercondensateurs est étudié. Un système comprenant un panneau photovoltaïque et un module de supercondensateurs est modélisé avec une représentation de type circuit électrique. Une fois les modèles présentés et le bon accord avec les résultats expérimentaux vérifié, l'association du panneau photovoltaïque avec le module de supercondensateurs est simulée pour différentes valeurs de l'éclairement solaire. Les résultats obtenus sont discutés en comparant notamment les temps de charge.*

MOTS-CLÉS : *stockage d'énergie, énergie photovoltaïque, supercondensateurs, modélisation*

1 Introduction

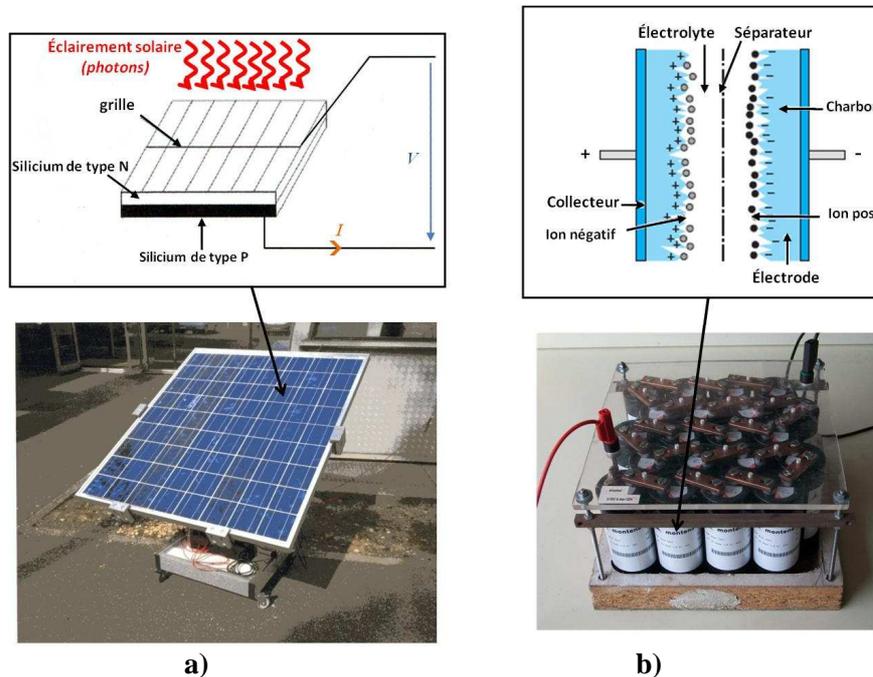
La production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelable comme la conversion photovoltaïque est en constante progression. Pour répondre à tous les besoins en électricité, la production peut de plus en plus être amenée à être décentralisée. Dans le cas d'une application photovoltaïque, le stockage dépend de l'intermittence du gisement solaire. L'énergie électrique emmagasinée et sa restitution doivent également être adaptées à l'utilisation sur le site isolé. Cependant, le

stockage décentralisé usuellement réalisé par des batteries ne permet pas de délivrer des densités de courant importantes sur de faibles durées. Même si les batteries ont une densité d'énergie plus élevée, les supercondensateurs présentent une puissance spécifique de charge et de décharge bien supérieure. Les supercondensateurs apparaissent donc comme une solution intéressante pour délivrer des pics de puissance électrique. De plus, les supercondensateurs ont l'avantage de pouvoir être utilisés sur un nombre de cycles plus élevé que les batteries et peuvent fonctionner sur une gamme de température plus étendue. Par ailleurs, les supercondensateurs sont constitués de matériaux moins polluants. À l'heure actuelle, ils sont uniquement mis en œuvre dans des applications liées aux véhicules de transport : dans les réseaux d'alimentation par caténaïres de trains, tramways et de métros ou pour satisfaire les appels de puissance de la chaîne de traction d'automobiles (Gualous 2007).

Dans le présent travail, l'utilisation de supercondensateurs comme moyen de stockage de l'énergie photovoltaïque est envisagée à travers l'étude par simulation d'un système comprenant un panneau photovoltaïque et un module de supercondensateurs. Après avoir présenté les modèles utilisés, les résultats obtenus pour les simulations sont montrés et discutés.

2 Modélisation

La figure 1 montre un panneau photovoltaïque et un module de supercondensateurs avec les schémas d'une cellule solaire et d'un supercondensateur. Les cellules solaires du panneau photovoltaïque et les supercondensateurs sont modélisés en utilisant une représentation de type circuit électrique.



a) *Panneau photovoltaïque et schéma d'une cellule photovoltaïque*
b) *Module de supercondensateurs et schéma d'un de ses éléments.*

Une cellule photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant électrique. Une représentation simple et efficace consiste à décrire la cellule solaire comme un circuit électrique (Bernard 2004). Les éléments de ce circuit permettent de restituer les phénomènes ayant lieu au niveau de la jonction des deux couches semi-conductrices de type N et P, et des contacts des électrodes (figure 1.a). De cette manière, la cellule photovoltaïque peut être représentée par une source de courant, le courant photo-généré, une diode, une résistance série R_s et une résistance parallèle R_p (figure 2). La résistance série R_s est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction, et des contacts face avant et arrière. La résistance parallèle R_p provient des contacts métalliques et des résistances de fuite sur la périphérie de la cellule. Soulignons que lorsqu'on considère un panneau ou un ensemble de panneaux photovoltaïques, constitués de N_s cellules en série et N_p cellules en parallèles, la résistances série équivalente $R_{eq,s}$ et la résistance parallèle équivalente $R_{eq,p}$ sont respectivement égales à $R_{eq,s} = \frac{N_s}{N_p} R_s$ et

$R_{eq,p} = \frac{N_s}{N_p} R_p$. Le courant d'intensité électrique I délivré par le panneau photovoltaïque dépend de l'intensité du rayonnement solaire incident, l'éclairement noté G , ainsi que de la tension V de la charge appliquée.

Éclairement solaire G

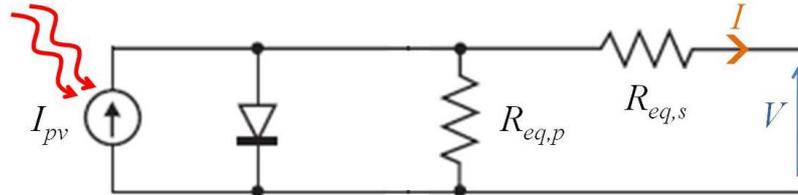


Figure 2 . Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Un supercondensateur est constitué de deux électrodes poreuses entourées par un électrolyte (figure 1.b). Les deux électrodes sont chacune connectée à un collecteur métallique. Elles sont séparées par une membrane isolante poreuse qui permet d'assurer la conduction ionique. Le stockage de l'énergie électrique s'effectue par les ions de l'électrolyte au voisinage de la surface de chaque électrode. La distribution des ces ions est modifiée sous l'influence électrostatique de la tension appliquée (Lassègue 2001).

Pour être le plus fidèle possible à la réalité, le modèle d'un supercondensateur doit rendre compte des nombreux phénomènes internes ayant lieu lors des phases de charge et de décharge. Parmi ces phénomènes, citons les résistances électriques présentées par les électrodes et les collecteurs métalliques. Le modèle doit aussi tenir compte de la non-linéarité du stockage des charges, du comportement électrique de type ligne de transmission et de la redistribution interne de la charge stockée. Il y a également le phénomène d'autodécharge dû aux fuites électriques à considérer. Tous ces phénomènes et paramètres sont représentés dans les modèles de type circuit par un assemblage de résistances électriques reliées à des condensateurs. La différence entre les différents modèles existants réside dans la détermination et l'organisation des grandeurs associées à ces résistances et capacités. La détermination des valeurs des résistances et des capacités est faite en analysant la tension aux bornes du supercondensateur lors d'essais de charge ou de décharge à courant constant.

Parmi les modèles de type circuit, le modèle multibranche permet de rendre compte de la majorité de ces phénomènes (Belhachemi 2001). Il comprend une ligne de transmission non-linéaire de résistance totale R et

de capacité totale C . La ligne de transmission est constituée de n branches en parallèle contenant chacune une résistance et un condensateur en série (cellule RC). Ces branches permettent de modéliser les phénomènes ayant des temps courts. La ligne de transmission est complétée par deux autres branches RC dites « complémentaires » qui servent à tenir compte de la redistribution des charges aux temps longs.

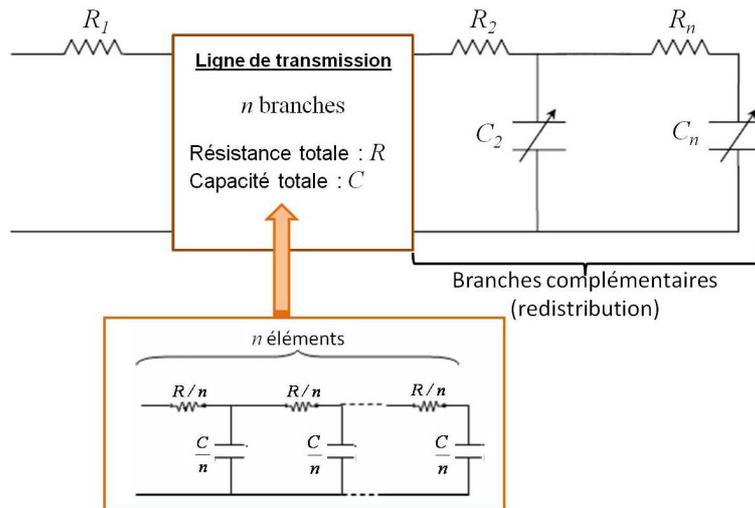


Figure 3 . Modèle multibranche d'un supercondensateur.

3 Résultats et discussion

Le modèle équivalent des cellules du panneau photovoltaïque et le modèle multibranche pour le supercondensateur ont été réalisés à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. Ces modèles ont ensuite été assemblés pour apprécier le stockage de l'énergie photovoltaïque par les supercondensateurs. Toutes les simulations ont été menées à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. Comme notre objectif n'est pas de modéliser avec finesse une cellule photovoltaïque ni un supercondensateur, mais d'étudier le comportement de l'assemblage des deux, il nous a semblé judicieux de partir d'exemples connus pour les éléments du système complet. Le cas du panneau photovoltaïque type Kyocera KC200GT et celui d'un module de 15 supercondensateurs en série type Maxwell PC7223 ont été considérés. Ils ont déjà fait l'objet d'études individuelles (Villalva et al. 2009) (Belhachemi 2001). Le choix de mettre ensemble ces deux composants n'est pas anodin puisque la tension nominale du module de supercondensateurs de 37,5 V est supérieure à la tension en circuit ouvert du panneau photovoltaïque de 32,9 V prise dans les

conditions STC (Standard Test Conditions, éclairage G de 1000 W.m^{-2} , masse atmosphérique AM1,5 et une température de cellule T_c de 25°C).

Dans un premier temps, la validité de chacun des modèles réalisés, celui du panneau photovoltaïque et celui du module de supercondensateurs, a été vérifiée pour garantir une précision suffisante lors de l'assemblage. Les caractéristiques courant-tension obtenues à l'aide du modèle équivalent du panneau photovoltaïque sont en très bon accord avec les résultats expérimentaux donnés par le constructeur. Les caractéristiques expérimentales et calculées pour plusieurs valeurs de l'éclairage solaire avec une température de cellule de 25°C sont données par la figure 4.

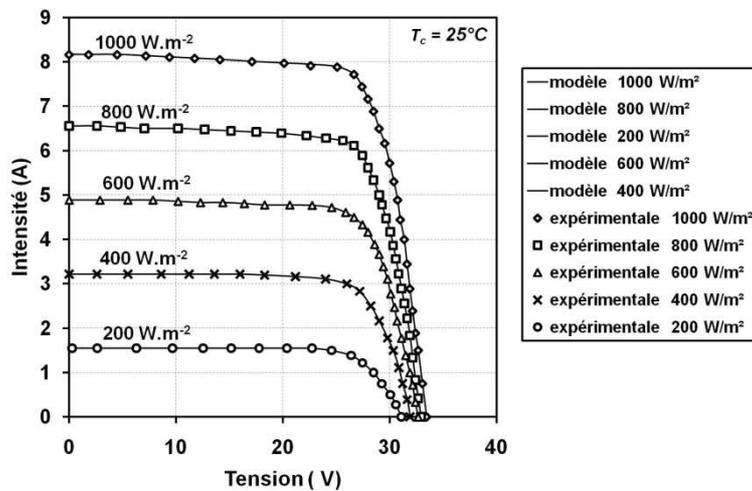


Figure 4. Caractéristique courant-tension expérimentale et simulée pour le panneau photovoltaïque KC200GT avec une température de cellule de 25°C .

La ligne de transmission du modèle multibranche contient $n = 15$ branches pour un supercondensateur. Ce nombre relativement élevé permet d'assurer un résultat suffisamment précis. Les résistances et les capacités variables (non-linéarité) ont été implémentées à l'aide de sous-blocs. Les résultats calculés sont également en très bon accord avec les résultats expérimentaux. En effet, ils corroborent ceux obtenus par l'étude expérimentale de Belhachemi comme le souligne l'exemple de la figure 5 pour un essai de charge de 100 A (Belhachemi 2001).

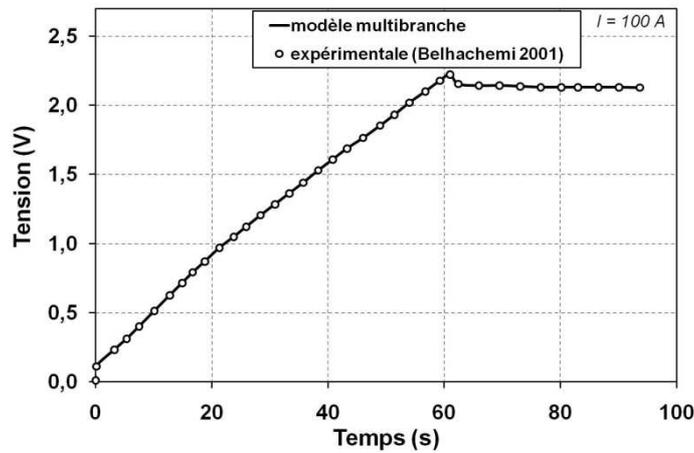


Figure 5 . Charge expérimentale et simulée d'un supercondensateur PC 7223 pour un courant de 100 A.

L'assemblage du modèle du panneau photovoltaïque avec celui du module de supercondensateurs a ensuite été simulé pour plusieurs valeurs de l'éclairement solaire G à la température ambiante T_a de 25°C . Le temps de charge des 15 supercondensateurs en série a été déterminé pour chaque éclairement considéré. Le critère choisi ici pour déterminer ce temps de charge est d'avoir une variation nulle de la tension aux bornes des supercondensateurs. L'exemple de la charge du module de supercondensateurs sous un éclairement de 1000 W.m^{-2} est représenté figure 6. Une durée de 2120 s est nécessaire pour charger le module de supercondensateurs.

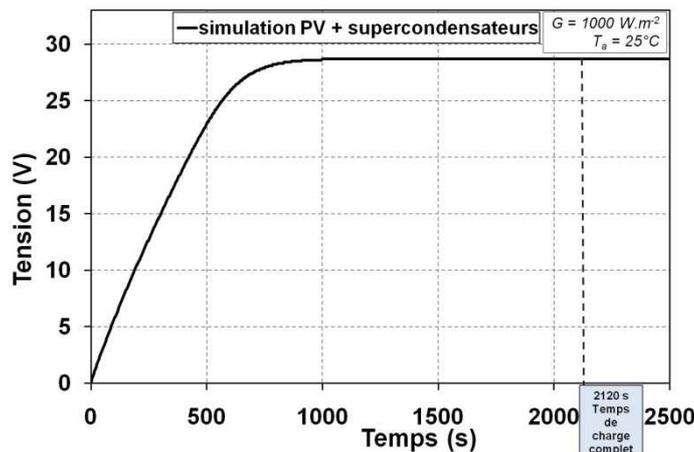


Figure 6 . Charge simulée du module de 15 supercondensateurs PC 7223 avec le panneau photovoltaïque KC200GT sous un éclairement solaire de 1000 W.m^{-2} .

Les temps de charge obtenus pour les différentes valeurs de l'éclairement du Soleil et pour une température ambiante de 25°C sont reportés sur le graphique de la figure 7. Le temps de charge diminue quand l'éclairement augmente selon la relation indiquée sur cette figure. Il varie d'environ 2100 s (soit 35 minutes) pour un fort éclairement de 1000 W.m⁻² à environ 6300 s (1h45 minutes) pour un éclairement peu élevé de 200 W.m⁻².

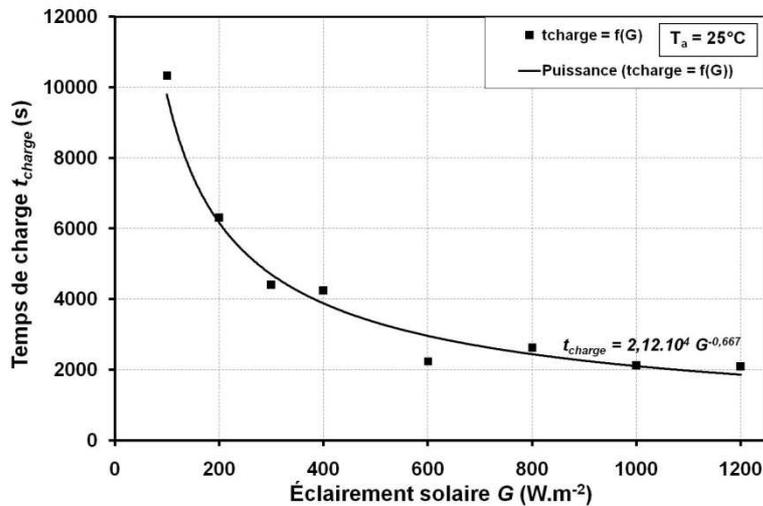
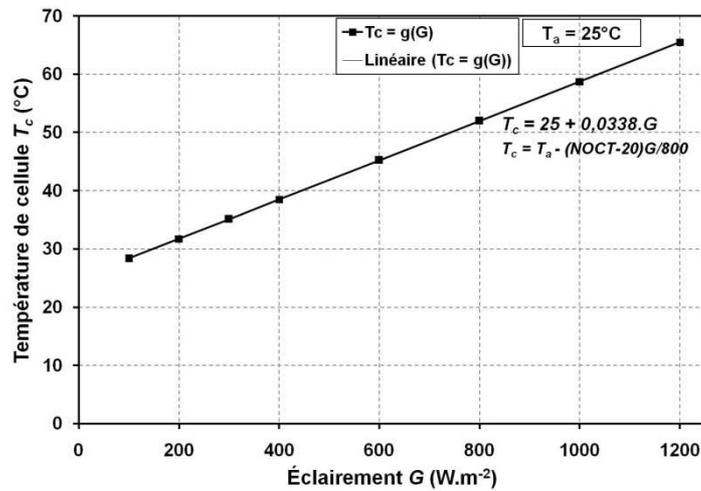


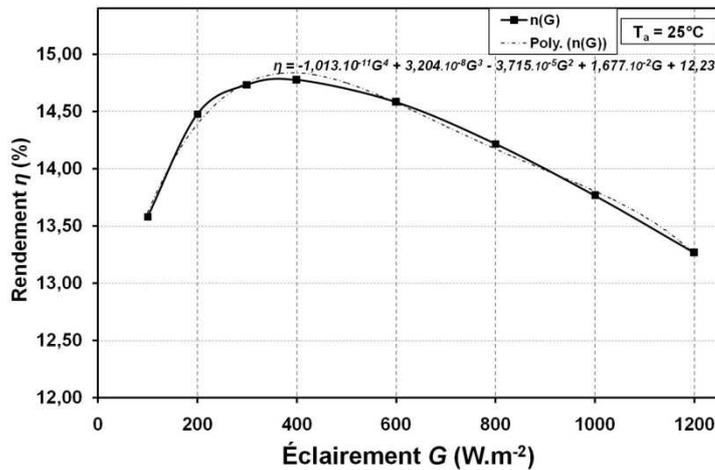
Figure 7 . Temps de charge simulé pour le module de 15 supercondensateurs PC 7223 suivant l'éclairement reçu par le panneau photovoltaïque KC200GT.

Lorsque l'éclairement est supérieur à 500 W.m⁻² le temps de charge devient relativement constant, en moyenne de 2270 s (37 minutes) avec une dispersion de 240 s (4 minutes, soit 11%). Cela s'explique par le fait que lorsque l'éclairement est plus élevé, pour une température ambiante T_a donnée, la température de cellule T_c devient plus grande (figure 8.a) (Luque et Hegedus 2003). Cet échauffement entraîne une perte d'efficacité quand l'éclairement croît. Pour illustrer cette perte, on a calculé le rendement photovoltaïque η suivant l'éclairement (figure 8.b). La diminution du rendement est de l'ordre 1,5% entre 400 W.m⁻² et 1000 W.m⁻². Mais, lorsque l'éclairement est plus fort, la puissance électrique délivrée par le panneau doit être plus importante. Cette augmentation est en réalité modérée par la diminution de l'efficacité de la conversion photovoltaïque. Ainsi, une puissance électrique relativement constante est

fournie aux supercondensateurs pour des valeurs d'éclairement supérieures à 500 W.m^{-2} . De manière pratique, ce résultat est intéressant car lorsque l'éclairement solaire devient supérieur à 500 W.m^{-2} sur une journée, la température ambiante variant peu, la charge des supercondensateurs peut se faire régulièrement et la plus rapidement possible. Ces valeurs d'éclairement sont par exemple obtenues en milieu de matinée jusqu'en fin d'après-midi pour une journée ensoleillée de printemps ou d'été en Europe, ou dans un pays chaud.



a)



b)

Figure 8 . Température de cellule (a) et rendement photovoltaïque (b) en fonction de l'éclairement pour une cellule du panneau photovoltaïque KC200GT.

Comme l'éclairement d'une journée reste relativement constant sur des intervalles d'une dizaine de minutes voire sur quelques dizaines de minutes en supposant qu'il n'y ait pas de passages nuageux, la courbe de la figure 7 est intéressante pour un utilisateur souhaitant connaître le temps de charge afin d'intégrer les supercondensateurs dans une chaîne de conversion photovoltaïque. Il n'est pas obligé de prendre un critère aussi poussé que le nôtre (dérivée nulle) permettant d'avoir une charge pleine. Un contrôleur permet en effet le basculement des supercondensateurs vers une charge résistive ou un moteur à démarrer dès qu'une valeur seuil fixée de tension est atteinte. L'intégration des supercondensateurs dans une chaîne de conversion photovoltaïque pourra faciliter le démarrage du moteur d'une pompe ou d'un véhicule de transport en commun (Djerdir et al. 2006), ou à l'inverse récupérer l'énergie de freinage d'un moteur, ou bien encore satisfaire à d'autres applications en cours de développement nécessitant de forts appels de puissance électrique (Bergonzini et al. 2010) (Thounthonga et al. 2011).

4 Conclusion

Le stockage de l'énergie photovoltaïque par des supercondensateurs a été envisagé à travers la présente étude par simulation numérique. Un système comprenant un panneau photovoltaïque associé à un module de supercondensateurs a été modélisé par une représentation de type circuit électrique. Le circuit équivalent de la photopile a été considéré et le modèle multibranche de représentation des supercondensateurs a été choisi en raison de son aptitude à restituer les phénomènes liés aux charges électriques (non-linéarité du stockage, ligne de transmission, redistribution des charges). Les résultats des calculs effectués à partir de ces modèles pris séparément sont en très bon accord avec les résultats expérimentaux obtenus dans différents travaux publiés. Par la suite, les deux modèles précis ont été assemblés et le système complet a été simulé pour différentes valeurs de l'éclairement solaire. Une relation entre le temps de charge des supercondensateurs et l'éclairement constant a été obtenue. À termes, l'utilisation de ce modèle panneau photovoltaïque - supercondensateurs permettra de connaître le temps de charge suivant les variations climatiques en un site isolé donné afin d'avoir des durées optimales de stockage de l'énergie électrique selon les appels de puissance de la charge utilisée au sein de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque.

Bibliographie

Belhachemi F., Modélisation et caractérisation des supercondensateurs à couche double électrique utilisés en électronique de puissance, thèse de doctorat, Nancy, 2001.

Bergonzini C., Brunelli D., Benini L., Comparison of energy intake prediction algorithms for systems powered by photovoltaic harvesters, *Microelectronics Journal*, vol. 41, 2010, p. 766-777.

Bernard J., *Énergie solaire*, Editions Ellipses, Paris, 2004.

Djerdir A., Elkadri K., Miraoui A., Alimentation par biberonnage solaire photovoltaïque d'une chaîne de motorisation électrique, *Revue des Énergies Renouvelables*, vol. 9 n°2, 2006, p. 63-74.

Gualous H., Gallay R., Applications des supercondensateurs, *Techniques de l'ingénieur*, D3335, 2007.

Lassègue J.-C., Supercondensateurs, *Techniques de l'ingénieur*, D3334, 2001.

Luque A., Hegedus S., *Handbook of photovoltaic science and engineering*, John Wiley and Sons Ltd., Chichester, 2003.

Thounthonga P., Chunkagb V., Sethakul P., Sikkabut S., Pierfederici S., Davat B., Energy management of fuel cell/solar cell/supercapacitor hybrid power source, *Journal of Power Sources*, vol. 196, 2011, p. 313-324.

Villalva M. G., Gazoli J. R., Ruppert F. E., Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays, *Brazilian Journal of Power Electronics*, vol. 14 n°1, 2009, p. 35-45.



Mohamed Ansoumane Camara est actuellement doctorant en dernière année de thèse au CERTES (Centre d'Études et de Recherche en Thermique Environnement et Systèmes) de l'Université Paris-Est. Ingénieur électrotechnicien, il est enseignant-chercheur à l'Université de Conakry (Guinée) en Génie électrique et Maintenance industrielle. Ses recherches doctorales sous la direction du Pr Jean-Félix-Durastanti et du Dr Pierre-Olivier Logerais portent sur la modélisation du stockage de

l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs, une technique de stockage d'électricité intéressante pour les forts appels de puissance électrique.



Pierre-Olivier Logerais est Maître de conférences en énergétique à l'IUT de Sénart Fontainebleau. Après l'obtention de son doctorat en 2007 sur le thème des fours de recuit pour la microélectronique sous la direction du Pr Anne Bouteville et une recherche postdoctorale sur des problèmes de mécanique des fluides avec le Pr Abdelhak Ambari à l'École Arts et Métiers ParisTech d'Angers, il développe depuis 2009 des recherches sur l'influence d'agents extérieurs et du vieillissement sur l'efficacité des modules photovoltaïques au sein de l'équipe « optimisation des systèmes photovoltaïques » du CERTES (Centre d'Études et de Recherche en Thermique Environnement et Systèmes) de l'Université Paris-Est.



Olivier Riou est actuellement enseignant-chercheur à l'IUT de Sénart Fontainebleau et membre du laboratoire CERTES (Centre d'Études et de Recherches en Thermique, Environnement et Systèmes) de l'Université Paris Est Créteil. Docteur en physique, il a réalisé sa thèse sous la direction du Pr Jacques Chaussy, directeur de recherche au centre de recherche sur les très basses températures à Grenoble. Ses activités de recherches portent sur la thermographie infrarouge, les techniques de contrôles non destructifs et les énergies renouvelables.



Jean-Félix Durastanti est Professeur d'énergétique à l'IUT de Sénart Fontainebleau et ingénieur diplômé de l'École Spéciale des Travaux Publics. Il coordonne l'équipe d'optimisation des systèmes photovoltaïques au sein du Centre d'Études et de Recherche en Thermique Environnement et Systèmes (CERTES). Après un doctorat à l'Université de Provence portant sur l'étude d'un système de production de vapeur par la centrale thermique solaire THEK, il développe ses travaux autour du thème de la modélisation de systèmes thermiques tels que les réseaux de transfert de chaleur ou les échangeurs à géométrie complexe.