

PROTOTYPER POUR TESTER, TESTER POUR INNOVER : DES TECHNIQUES DE L'INGENIERIE AUX PROBLEMATIQUES MANAGERIALES

Gilles Garel *

Résumé. - Cet article à caractère exploratoire considère les prototypes et la simulation comme un objet de recherche pertinent pour la partie managériale des sciences de gestion. Il vise à structurer la littérature qui existe et, dans une moindre mesure, ce qu'il est possible d'explorer. Il précise d'abord les « figures du prototypage » en définissant les notions de base et en faisant le point sur les techniques de prototypage. Dans un second temps, l'article rappelle et discute les fonctions des prototypes. Enfin, il articule les variables de la performance de prototypage et les leviers d'action sur ces variables.

Mots-clés : prototypes, simulation, tests, développement de produits nouveaux, savoirs tacites.

1. Introduction

En 1995, le navigateur Sir Peter Blake a préparé la coupe de l'America sur deux bateaux prototypes Team New Zeland. En les faisant naviguer en parallèle, il a pu tester in situ des différences de design. Les essais en mer étaient complétés par des simulations virtuelles. L'existence de deux bateaux a permis de réaliser deux fois plus de tests dans un temps donné. Si cette approche a pu être jugée très coûteuse par les concurrents de Team New Zeland, le retour sur investissement est indéniable : P. Blake remporte la compétition cette année-là (Schrage, 2000, p. 178). Comme P. Blake, de nombreuses entreprises utilisent des prototypes pour développer des produits nouveaux performants.

* Professeur à l'Université de Marne la Vallée (Prism OEP).

Cet article a un caractère exploratoire. Il ne mobilise pas d'étude de cas ni ne traite d'un problème particulier. Il explore et structure, essentiellement à partir d'une revue de littérature, des problématiques de management que soulèvent l'utilisation des prototypes et la réalisation des tests dans les développements de nouveaux produits et de nouveaux services. Au départ, il y a un paradoxe.

D'une part, les tests et les simulations des prototypes des nouveaux produits et services relèvent de trois enjeux principalement.

1. D'abord, les techniques de prototypage se développent fortement aujourd'hui et concernent de nombreux secteurs d'activités : aéronautique, informatique¹, création vidéo et cinématographique, matériel immobilier, santé, électroménager, automobile, équipements sportifs, pharmacie... Ces évolutions techniques transforment à la fois l'organisation de la gestion de la RID –Recherche Innovation Développement- (Le Masson, 2001), les savoirs des concepteurs et la valeur des informations produites.

2. Ensuite, les variables de performance QCD (Qualité / Coût / Délai) des produits sont directement dépendantes des phases de prototypage. Prenons-en trois illustrations :

- La maîtrise de la qualité du produit trouve parfois une traduction radicale comme dans les « crash tests » automobiles par exemple (Thomke, 2001b).
- L'évolution des outils de « screening » dans l'industrie pharmaceutique accroît fortement les possibilités de criblage simultané de molécules tout en divisant par 260 le coût par rapport à une approche traditionnelle (Thomke et alii, 2000).
- En générant plus tôt des informations à valeur ajoutée sur le produit en développement, les prototypes peuvent réduire le « time to market », variable cruciale dans les industries où les cycles de vie des produits et des technologies sont très courts (Iansiti, 1998).

3. Enfin, les phases de prototypage, d'expérimentation et d'analyse des tests occupent une partie importante du temps de développement des nouveaux produits. Ainsi, Allen (1966, p. 60 cité in Loch et alii, 2001) observe que les équipes de développement qu'il étudie passent plus de 77 % de leur temps en expérimentation et en analyse de tests. Cusumano et Selby (1995) constatent, quant à eux, que 45 % du temps de développement chez Microsoft est consacré aux tests.

¹ Pas seulement en matière de développement des logiciels, mais également du matériel (Ulrich et Eppinger -2000, p. 274- donnent l'exemple du développement de la souris trackball du duo d'Apple). Utilisant l'exemple de la première souris d'Apple, Tom Kelley (2003) rappelle qu'une partie du prototype, un beurrier, a été achetée au magasin du coin de la rue. Ce beurrier, d'une valeur de quelques dollars, abritait exactement la boule roulante de la souris.

D'autre part, face à ces enjeux, il faut bien constater que peu de travaux étudient les prototypes d'un point de vue managérial. De manière générale, les prototypes restent un trou noir pour la littérature en sciences de gestion, reléguant cet objet aux sciences de l'ingénieur, à l'ergonomie, voire à la sociologie. Sans approfondir l'analyse, on peut suggérer deux explications de l'absence d'introspection gestionnaire sur ce sujet. D'une part, la difficulté d'accéder à des terrains de recherche, notamment pour des raisons de confidentialité. D'autre part, les chercheurs qui étudient le développement des produits nouveaux n'ont pas forcément développé les méthodologies ad hoc ou les outils de recherche qui leur permettraient de traiter les problématiques du prototypage. On trouvera néanmoins dans la littérature sur le développement des produits nouveaux un traitement des prototypes et de la simulation comme d'une boîte noire constituant l'étape d'un séquençement souvent linéaire. De même, les systèmes d'informations ou le management des services (Abramovici et Bancel Charenso, 2004) intègrent depuis longtemps les prototypes dans les phases de développement de projets, en particulier pour valider des interactions clients. Aujourd'hui, des travaux explicitement consacrés aux prototypes dans le champ du management apparaissent. M. Schrage du MIT et S. Thomke de la Harvard Business School font partie des contributeurs les plus féconds.

Cet article considère les prototypes et la simulation comme un objet de recherche pertinent pour les sciences de gestion. Il vise à structurer ce qui existe et, dans une moindre mesure, ce qu'il est possible d'explorer. Il s'articule en trois parties. D'abord, il précise les « figures du prototypage » (2.). Dans un second temps, il définit et discute les fonctions des prototypes (3.). Enfin, il articule les variables de la performance de prototypage et les leviers d'action sur ces variables (4.).

2. Les figures du prototypage

Les prototypes relèvent de plusieurs figures en management (2.1.). La notion de prototype peut être précisée en la situant par rapport à des notions proches (2.2.). Ensuite, il devient possible de préciser les techniques de prototypage. Au-delà de ces caractéristiques techniques, ce sont leurs implications managériales qui nous intéressent ici (2.3.).

2.1 La notion de prototype en sciences de gestion

Depuis Woodward (1965), l'organisation industrielle et la gestion de production ont caractérisé les prototypes comme ce qui relève de la production unitaire ou en petites séries, qu'elle qu'en soit l'échelle, qu'il s'agisse de la construction d'avions de lignes ou de paires de chaussures. Mutatis mutandis, on retrouve en management stratégique une approche similaire avec la « querelle du standard et du sur-mesure » (Lampel et Mintzberg, 1997).

Naturellement, c'est dans la littérature sur le « problem solving » et sur le design que les notions de prototypes, d'expérimentation et de tests sont abordées. Depuis les travaux de Simon (1969) sur la décision ou sur les processus d'essai erreur (Marples, 1961, Allen, 1966), un courant de recherche étudie le rôle des tests et des expérimentations dans les processus de développement des nouveaux produits (Clark et Fujimoto 1991, Clark et Wheelwright, 1992, Iansiti, 1998). Des travaux en ingénierie de la conception vont aborder à la marge la notion de prototype, mais ne la traiteront pas pour elle-même. Par exemple, Hatchuel, Le Masson et Weil (2002) parlent de « logique de prototypage rapide » comme l'un des grands principes d'organisation de l'innovation. C'est l'organisation qui est caractérisée par la « variable » prototype mais cette dernière n'est pas disséquée ou analysée pour elle-même. De la même manière, la recombinaison des métiers de la conception est une problématique notamment induite des transformations des outils de prototypage, mais ces derniers ne sont pas alors pris comme objet d'étude en soi.

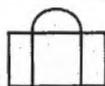
Nonaka (1994), quant à lui, a développé une conception métaphorique des prototypes. Ils agissent alors comme des moyens d'explicitation des savoirs tacites des concepteurs. La suite de l'article reviendra sur cette acception.

2.2 La notion de prototype

Dans le cadre du développement de produits nouveaux, la notion de prototype semble très proche d'autres notions (test, expérimentation, design...). Ceci conduit à des clarifications nécessaires.

Notions	Définitions	Exemples
Design	<ul style="list-style-type: none"> Création de solutions synthétiques concernant la forme des produits à venir et / ou de leurs procédés de fabrication. Représentation de systèmes qui permettent de satisfaire des besoins au travers du rapport entre des fonctions et des éléments physiques (Loch, 2001). 	<ul style="list-style-type: none"> Le design d'une porte associera deux fonctions (ouvrir et fermer, y compris avec un verrou, d'un côté ou des deux côtés...) et plusieurs composants (serrure, poignée...).
Modèle	<ul style="list-style-type: none"> Approximation de la réalité qui accentue des traits particuliers (Schrage, 2000, p. 7). 	<ul style="list-style-type: none"> Un modèle de comportement du consommateur. La serlienne est un modèle architectural réinventé à chaque nouvelle réalisation.²

² Exemple de serlienne :



Prototype	<ul style="list-style-type: none"> • Approximation du produit selon une, ou davantage, dimension(s) digne(s) d'intérêt (d'après Ulrich et Eppinger, 2000, p. 275). • Ensemble des moyens de représentation d'une réalité à venir. 	<ul style="list-style-type: none"> • La répétition générale d'un événement à venir (ex. : cérémonie d'ouverture des JO / basculement de systèmes d'information à l'euro...). • La maquette d'un nouveau produit.
Simulation	<ul style="list-style-type: none"> • Représentation de caractéristiques spécifiques et sélectionnées d'un comportement d'un système physique ou d'un système abstrait par un autre système (Thomke, 2001b). 	<ul style="list-style-type: none"> • Représentation numérique d'un accident ou du fonctionnement d'une pièce prototype d'un équipement sportif.
Test	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation des caractéristiques d'une fonction, d'un système ou d'un composant. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure d'une résistance mécanique d'une pièce prototype ou utilisation d'un modèle de comportement du consommateur.

Nous retenons le terme de prototype pour définir l'ensemble des moyens de représentation d'une réalité à venir. Les prototypes sont à la fois des ébauches des produits ou des services et des processus qui les déterminent. C'est le produit ou le service, mais également le process qui est testé à partir des informations générées par les mises à l'épreuve du prototype. L'ensemble de ces définitions appelle plusieurs observations.

On peut considérer que la notion de prototype intègre les autres notions. En tant que représentation d'une réalité à venir le prototype met à l'épreuve un modèle sous-jacent et constitue la base des tests et des simulations. Le design peut se définir comme un attribut du prototype, lui-même objet de mises à l'épreuve.

Le modèle se situe à un niveau d'abstraction supérieur au prototype. Pendant longtemps on a pu illustrer cette différence avec le clivage « prototype physique » (ex. : la maquette d'un avion à l'échelle 1) versus « modèle virtuel » (ex. : une simulation numérique de résistance). Pourtant, la distinction « virtuel » / « réel » s'est dissoute avec le développement des techniques. Par exemple, un simulateur de vol est un cockpit bien réel qui met à l'épreuve physique des pilotes. Pourtant, le vol est virtuel. Les techniques actuelles de prototypage recréent la réalité. Certains constructeurs automobiles ou fabricants d'équipements sportifs utilisent de façon complémentaire les maquettes réelles et virtuelles pour tester, à moindre coût, plusieurs variantes d'un projet. Par exemple, la réalisation d'une maquette physique fixe au mieux les idées d'un panel d'évaluation, puis une digitalisation rapide de la maquette physique est réalisée (on parle de « reverse engineering »). Cette digitalisation sert de support à la création d'une maquette numérique, elle-même déclinée en plusieurs variantes présentant différentes solutions envisagées. Inversement, un procédé comme la stéréolithographie permet de créer des

objets en résine à partir d'une modélisation informatique puis de les soumettre à des tests mécaniques comme des essais en soufflerie.

Les prototypes ne sont pas forcément des modèles sophistiqués. Certains bricolages, comme des bouts de pâtes à modeler ou des petites pièces de bois qui servent à maquetter en temps réel sur un plateau de conception par exemple sont des prototypes.

Le prototype ne représente qu'une partie de la réalité à venir. Si le prototype est la réplique stricte du produit alors il n'est plus un prototype. Les prototypes sont des réducteurs de complexité c'est-à-dire des « facilitateurs » de l'activité de conception. Les prototypes ne devraient fournir aux acteurs de la conception que les seules informations nécessaires à l'action et à la décision. En cela, ils sont « laconiques », éliminant des composantes inutiles et permettant aux concepteurs d'interagir sur l'essentiel. Cet aspect parcellaire ou focalisé³ du prototype conduit à la « problématique de la pertinence ». Que faut-il prototyper ? Qu'est-ce qu'il est pertinent (et donc sur quels critères ?) de représenter au travers du prototype ? Faut-il, par exemple, fabriquer une voiture entière à plusieurs centaines de milliers d'euros l'unité pour la lancer contre un mur et tester la résistance au choc du seul radiateur ? Faut-il reconstituer fidèlement l'intérieur du cockpit d'un avion pour des essais aérodynamique en soufflerie ? Quel est le périmètre qu'il est pertinent de prototyper et de tester ? Les entreprises n'ont pas nécessairement de critères clairs pour répondre à ces interrogations.

2.3 Les techniques de prototypage

Ulrich et Eppinger (2000, p. 283) font observer que, si des centaines de techniques nouvelles de prototypage se sont développées depuis une dizaine d'années, deux caractéristiques se dégagent particulièrement. D'une part, on assiste au développement des techniques de 3D (CAO⁴, IAO et conception produit process, Ingénierie de Process Assistée par Ordinateur, prototypage rapide, prototypage virtuel...) en relation directe avec l'accroissement des puissances de calculs. D'autre part, les entreprises ont acquis une capacité à modeler des objets physiques à partir de la numérisation.

³ Ulrich et Eppinger (2000, p. 277) quant à eux distinguent à l'extrême les prototypes « compréhensifs » qui rendent compte de la totalité du produit ou du système à venir avec sa cohérence interne et les prototypes « focalisés » qui sont destinés à tester un aspect particulier.

⁴ La tendance est d'unifier les logiciels CAO 3D. En Europe le logiciel Catia de Dassault Systèmes s'est imposé, en particulier chez les constructeurs automobiles. Il se diffuse dans le réseau des partenaires. Outre-Atlantique, Ford et ses filiales utilisent I-Deas de SDRC et General Motors le système Pro/Engineer de PTC. Ces trois entreprises (Dassault Systèmes, SDRC et PTC) sont classées parmi les dix premières sociétés de logiciels CAO-FAO (Latorre, 2002).

La première tendance est bien illustrée par le *prototypage virtuel*. Celui-ci permet, par calcul, aux éléments finis de réaliser de nombreuses simulations de comportement cinématique, thermique ou de déformation⁵... Les avantages du prototypage rapide virtuel sont multiples. « Il y a d'abord la possibilité de tests précoces, et à moindre coût, de concepts différents s'appuyant sur des variétés de formes et de matières innombrables. On bénéficie de plus d'une interaction au plus tôt sur le produit entre corps de métiers différents ou entre concepteurs et clients » (Latorre, 2002). Des exemples remarquables de l'exploitation de la maquette virtuelle se trouvent dans l'univers du design automobile ou aéronautique (Lamy, 1999). En janvier 1999, au salon automobile de Detroit, Ford a présenté la maquette holographique de son nouveau concept de véhicule, la plus grande jamais construite, à l'échelle 1/2. L'image est obtenue à partir d'un écran de 3,7 mètres carrés éclairés par une intense source de lumière. L'hologramme permet de découvrir, au fur et à mesure que l'on s'en rapproche, les détails à l'intérieur du véhicule comme la motorisation par pile à combustible. A l'origine de cet engouement pour le virtuel chez les designers, on trouve la rapidité à formaliser les idées et l'ouverture de nouveaux champs de création grâce à la faculté de faire tourner les objets dans l'espace, ce qui génère un autre regard. L'ordinateur influence directement les créations de certains designers. Par exemple, on trouve davantage de formes arrondies chez la jeune génération de designers avec des outils de conception qui ne facilitent pas la réalisation des angles droits et qui présentent de nouveaux repères visuels.

Le *prototypage rapide* illustre bien la seconde tendance. Le prototypage rapide désigne les procédés qui permettent de restituer physiquement des objets 3D à partir de leurs données CAO, sans outillage et dans un temps très court. La fabrication des prototypes s'effectue par apport itératif de matière (point par point ou couche par couche) par opposition aux techniques traditionnelles comme l'usinage qui enlève de la matière. On parle de procédés de fabrication « additifs » et « soustractifs » (Bernard et Taillandier, 1998, p. 16). La stéréolithographie, quant à elle, est une technique de prototypage rapide utilisant des céramiques, des résines, des métaux...

La double tendance, soulignée par Ulrich et Eppinger, a trois conséquences. D'une part, elle dissout la frontière entre le réel et le virtuel. D'autre part, elle réduit fortement les délais et les coûts de prototypage. Enfin, la simulation informatique augmente la précision et la qualité des observations. Par exemple, dans un crash test automobile virtuel, on peut ralentir le temps

⁵ L'exploitation intensive du numérique depuis plusieurs années a permis une perpétuelle évolution du virtuel : meilleure représentation visuelle, possibilité de simulation en temps réel avec immersion du prototype virtuel modélisé dans des vrais décors où le produit sera utilisé. C'est le domaine de « la réalité virtuelle ». Ses techniques sont fondées sur l'interaction en temps réel avec un monde virtuel, à l'aide d'interfaces comportementales permettant l'immersion de l'utilisateur dans cet environnement.

pour détailler très finement les observations. Ce qui est invisible à l'œil nu devient un objet d'analyse possible.

3. Les fonctions des prototypes

Les problèmes de conception ne se posent pas d'eux-mêmes. « Dans la réalité, les problèmes ne se présentent pas en tant que tels mais sont construits à partir des savoirs disponibles à un certain moment, dans un certain contexte » (Nonaka, 1994). La fonction la plus générale des prototypes est de faire réagir. « Wow ! » écrit tout simplement M. Schrage à leurs propos. Pour Ulrich et Eppinger (2000, p. 280), les prototypes remplissent quatre fonctions : apprentissage (sur le produit, les process, la valeur...), communication (entre les concepteurs), intégration (technique du produit) et jalonnement (du projet). Nous insisterons ici particulièrement sur trois fonctions : la formalisation des représentations (3.1.), l'externalisation des savoirs tacites (3.2.) et la validation (3.3.).

3.1 Formaliser et confronter les représentations⁶

Parce qu'on les voit, parce qu'ils existent réellement ou virtuellement, les prototypes agissent comme des machines à révélation et à confrontation entre des mondes professionnels différents. Par exemple, les maquettes numériques rendent possible la confrontation entre différents métiers collaborant à un projet (designers, ingénieurs, marketing...) ou entre client et fournisseur parce qu'elles permettent l'accès en temps réel à un même objet. Les concepteurs qui appartiennent à des mondes professionnels peuvent confronter leurs représentations des problèmes qu'ils ont à résoudre. Le prototype clarifie les problèmes de conception : on peut dire ce que l'on sait, dire ce que l'on ne sait pas du tout, pas encore, on peut émettre des hypothèses sur des scénarii futurs possibles. Les prototypes sont bien des « supports de la communication » (Ulrich et Eppinger, 2000, p. 278), mais au-delà d'une communication entendue comme un simple échange d'informations.

3.1.1 Externaliser les savoirs tacites

Les savoirs tacites des concepteurs sont ce qu'ils connaissent sans avoir conscience de le connaître ou ce qu'il savent faire sans savoir dire comment ils le font. Nonaka (1994) appelle « externalisation » le processus par lequel le savoir tacite des acteurs se transforme en savoir

⁶ La littérature gestionnaire est jalonnée d'un certain nombre de citations illustrant cette problématique : « Comment puis-je savoir ce que je pense avant de voir ce que je dis ? » (K. Weick in I. Imai et alii, 1985) ; « Je ne sais pas du tout ce que je veux, mais je vous le dirai quand je le verrai » (Thomke et Bell, 2001) ; « C'est exactement ce que je vous ai demandé de développer mais ce n'est pas ce que je veux » (Thomke, 2001a).

explicite. Les prototypes sont un mode privilégié de l'explicitation des savoirs tacites et également de révélation de savoirs nouveaux. « Ainsi que Nisbet le souligne, la plupart de ce que Polanyi a appelé le savoir tacite est exprimable, autant que faire se peut, au travers de la métaphore » (op. cit.). Nonaka considère que les prototypes agissent comme des métaphores dans les activités de conception. « L'essence de la métaphore est de comprendre et d'expérimenter une chose dans les termes d'une autre » (G. Lakoff, M. Johnson cités in Nonaka, 1994). « La métaphore constitue une méthode essentielle de création d'un réseau de concepts favorisant l'émergence de nouveaux savoirs à partir des savoirs existants » explique Nonaka⁷. En tant que métaphores, les prototypes agissent comme des « objets intermédiaires de conception » selon l'expression de Jeantet et Boujut (2001). Le maître de musique joue une note sur son instrument pour montrer à son élève ce qu'il souhaite obtenir de lui. Il explique en agissant car les mots ne suffisent pas à épuiser la complexité du réel. La note se joue, elle ne se verbalise pas. En cela, le recours aux prototypes minimise les coûts de transaction entre concepteurs.

Garel (1994), dans une recherche sur l'externalisation des savoirs tacites à partir du cas des outils d'emboutissage, dans les projets automobiles explique : « lors d'une réunion de plateau se déroulant chez l'outilleur, une simulation de descente de poinçon d'embouti sur une maquette en polystyrène de l'outillage a permis de déceler un « risque de faisabilité » alors que les participants s'apprêtaient à clore la réunion. Depuis une heure environ, un metteur au point de l'outilleur et un metteur au point de l'usine observaient la maquette d'un air soucieux. Ils se regardaient, mais ne s'exprimaient pas. C'est la simulation de la descente de l'outil qui leur a permis d'exprimer leur savoir [...] tacite. Alors que le polystyrène descendait millimètre par millimètre à l'aide de petites cales de bois minutieusement disposées puis retirées, ils ont désigné l'endroit où l'outil définitif en fonte devrait, selon eux, déchirer la pièce un an et demi plus tard sur les outillages de série ».

De la même manière, une maquette « porte » en elle des savoirs de conception. Il est très fréquent de voir une pièce prototype d'un ancien projet servir d'étalon ou de point de référence dans les débats techniques. Les maquettes portent une partie de la mémoire des débats techniques du projet en cours et des projets antérieurs.

⁷ Même si les deux notions sont souvent confondues, la métaphore n'est pas l'analogie. « L'analogie réduit l'ambiguïté en soulignant les points communs entre deux « choses » différentes. La métaphore, qui implique des images [mentales], est guidée par l'intuition. Par ailleurs, l'analogie [...] est liée à la pensée rationnelle, [tandis que] que la métaphore fonctionne plus par le jeu de la libre association » (Nonaka, 1994).

3.2 Valider et apprendre au plus tôt

Les prototypes ont une évidente fonction d'apprentissage que ce soit sur les valeurs d'usage du produit, sur les coûts, sur la faisabilité industrielle, sur les fonctionnalités, sur les matériaux, sur le design, sur la maintenance, sur les équipes projets elles-mêmes... Par exemple, un prototype virtuel peut servir d'aide à la décision en permettant de gérer plusieurs *scénarii* de conception simultanément (Ballot, 1997). Pour un produit donné, le prototype virtuel permet de montrer de façon très réaliste une dizaine de variantes en termes de couleur et de matière, ce qui est impossible avec le prototypage physique qui, avec un ou deux échantillons seulement, laisse imaginer les autres versions possibles. Les prototypes permettent de valider des variables fonctionnelles et techniques. Un futur utilisateur peut même tester un produit ou un service à partir d'une version prototype. Gawer (2000) explique qu'Intel organise des « Plug Fest » pendant le développement de ses projets. Un hôtel est loué par l'entreprise et fermé au public. On y fait venir tous ceux qui sont concernés par une innovation d'interface pour qu'ils puissent tester la compatibilité de leurs prototypes avec le futur standard. Plus largement, on sait bien que l'industrie informatique « débuge » en amont ses logiciels en faisant circuler des versions prototypes auprès de clients volontaires et aguerris.

4. La performance des tests des prototypes

Quand des musiciens improvisent dans un groupe de jazz, leur performance est jugée sur le résultat, c'est-à-dire sur ce que l'on entend. Peu importe qu'ils soient géniaux individuellement ou qu'ils aient été formidables la veille, ce qui compte c'est la performance au moment où on la constate. Lorsque des concepteurs innovent, ce n'est pas leurs intentions, leur intelligence ou leurs compétences qui sont évaluées mais la performance de leur activité par rapport à des cibles déterminées ou déterminables. Les prototypes constituent le point focal de cette évaluation. Les prototypes ne sont réalisés que pour être éprouvés ou testés. Les choix de stratégie de tests influencent directement la performance de prototypage. Après avoir défini des variables de performance du prototypage (4.1.), nous présenterons des stratégies de tests possibles (4.2.) et l'analyse de leurs résultats (4.3.).

4.1 Les variables de la performance de prototypage

Loch, Terwiesch et Thomke (2001) définissent trois variables de performance du prototypage : les coûts, le niveau d'apprentissage et le moment d'apprentissage. Même réduite à ces variables simples, la performance de prototypage pose de redoutables problèmes de mise en œuvre et de définition.

4.1.1 Les coûts

Les coûts relèvent à la fois des dépenses de prototypage (études, réalisation, équipements, tests...) et des coûts de « retravail » (rework) liés à la nécessité de réaliser des modifications en cours de développement.

Le coût d'un prototype est évidemment très variable selon les types de projets. Marginal quand il s'agit de tester informatiquement (exemple de technologies de screening des compositions chimiques des médicaments), le coût peut atteindre des millions d'euros pour un crash test automobile. Selon Thomke qui a réalisé une étude chez BMW sur des tests de sécurité, le coût d'un seul crash test automobile se monte à 300 000 dollars. Ce coût équivaut à 91 simulations informatiques combinées (Thomke et Nimgade, 2000).

Dans ces conditions, la maîtrise et la diminution des coûts de développement est un enjeu très fort dans certaines industries comme l'automobile qui achète à ses fournisseurs les pièces prototypes entre 20 et 100 fois leur coût de fabrication en série. Dans l'automobile, les moyens de simulation n'ont pas fait disparaître les prototypes physiques parce qu'il est toujours nécessaire de pouvoir éprouver « l'âme » du produit. Aggeri et Segrestin (2002) ont montré les limites de la suppression de vagues de prototypes physiques dans le cas du développement de la Laguna II chez Renault SA. La connaissance de la structure du coût de revient des pièces prototypes ou du coût des réutilisations de prototypes (par exemple ne vaut-il pas mieux réaliser un prototype coûteux mais qui sert deux fois plutôt que de faire deux prototypes « bon marché » ?) est indispensable pour maîtriser ces investissements élevés. En outre, à supposer que la dépense de prototypage soit mesurable, on sait mal mesurer ce que « rapportent » les tests des prototypes. Il ne s'agit pas seulement de considérer l'évaluation du prototypage comme un coût, mais aussi comme un bénéfice. Comment par exemple mesurer le bénéfice d'une information pertinente produite en amont d'un projet ? Les systèmes d'informations capables d'arbitrer entre le coût de réalisation d'un prototype et le coût de la détection tardive d'une information en l'absence du même prototype sont à inventer.

4.1.2 Le niveau d'apprentissage

La seconde variable de performance est l'apprentissage entre chaque vague de prototypes. L'apprentissage ne commence pas nécessairement avec le premier test du prototype. L'organisation et ses membres peuvent avoir déjà appris. La vitesse et le niveau d'apprentissage dépendent des savoirs collectifs accumulés dans l'organisation au moment de chaque test. L'apprentissage ne se comprend qu'en trajectoire. On va d'autant plus vite à l'essentiel que l'on sait déjà quelque chose. On apprend d'autant mieux et d'autant plus vite que l'on sait déjà.

4.1.3 Le moment de l'apprentissage

Il ne s'agit pas seulement d'apprendre des prototypes, mais d'apprendre le plus tôt possible parce que la valeur de l'information dépend du moment où elle est générée (Boehm, 1991, Thomke et Fujimoto, 2000). Midler (1993) a bien montré que l'apprentissage en amont d'un projet permettait de tirer parti des degrés de liberté qui existent encore à ce stade. Par ailleurs, l'apprentissage en amont évite les « rework » liés aux découvertes tardives conduisant à remettre en cause des validations. Bohn (1987 -cité in Thomke et Bell, 2001) a montré, dans le cas des projets informatiques, que le coût de correction des modifications augmente au moment de la découverte (plus c'est tard plus c'est cher). Finalement, plus l'apprentissage a lieu en amont, plus le délai et le coût de prototypage se réduisent.

Finalement, le prototypage performant est celui qui permet d'apprendre vite et bien et donc à moindre coût. Il existe des leviers d'action sur ces variables de performance. La question est de les repérer et de les actionner. Selon Thomke et Bell (2001), qui la connaissent bien, la littérature sur le prototypage montre que les entreprises testent trop peu et trop tard.

4.2 L'organisation des tests : analyse des stratégies possibles

La stratégie optimale d'organisation des tests articule de nombreuses variables interdépendantes : le coût du test, la fréquence (ou le délai entre chaque vague), le nombre et la nature des problèmes de développement cumulés à l'instant « T » (et donc la possibilité de mesurer la baisse du nombre de « problèmes de design »), la fidélité du test (qui dépend notamment de la fraction des problèmes détectés), la fidélité du résultat... On peut réduire l'organisation des tests à deux critères (Thomke et alii, 1998, Loch et alii, 2001, Thomke et Bell, 2001⁸) :

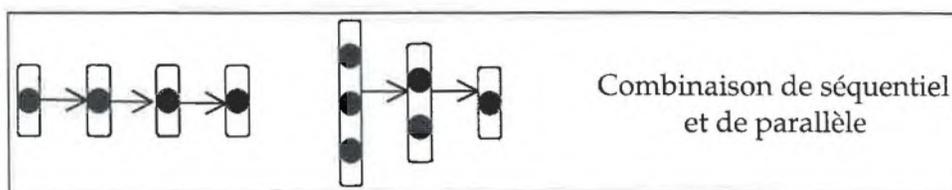
- la fréquence : tester souvent ou pas ?⁹ ;
- l'organisation des tests : tester séquentiellement ou parallèlement par exemple.

Sur la base de ces deux critères, quelques travaux ont été réalisés essentiellement autour de S. Thomke à Harvard. Plusieurs enseignements contingents se dégagent. Différentes possibilités d'organisation des tests sont envisageables : séquentiel fréquent, séquentiel espacé, combinaison de séquentiel et de parallèle... Loch et alii (2001) et Thomke et Bell (2001)

⁸ Thomke et Bell (2001) ont réalisé une recherche sur le développement des circuits intégrés (caractérisé par une incertitude technique) et sur le développement des logiciels (caractérisé par une incertitude client).

⁹ Le prototypage peut être périodique pour Clark et Wheelwright (1992). Iansiti (1998), de son côté, met l'accent sur les vagues successives de prototypes dans des entreprises comme Netscape ou Yahoo.

modélisent une stratégie mixte qui associe test séquentiel et test parallèle en vue de diminuer simultanément le délai de réalisation et le coût.



Une modélisation du nombre optimal de tests est proposée. Les tests séquentiels se justifient quand l'organisation est capable d'apprendre vite entre chaque vague de test. A contrario s'il n'y a pas ou peu d'apprentissage, l'organisation parallèle des tests se justifie. Le développement des nouvelles technologies, en diminuant leur coût, a fortement accru l'intérêt des tests parallèles (Loch et alii, 1998, Terwiesch et Loch, 1999). Ainsi dans l'industrie pharmaceutique, au lieu de tester cinq à dix compositions chimiques par itération, un seul test permet de « cribler » des centaines voire des milliers de molécules (Bonhomme et Midler, 1999).

Dans le cas des tests séquentiels, trois situations peuvent être distinguées en fonction du degré de recouvrement entre les tests (Thomke et Bell, 2001) : (1) le *recouvrement total* qui correspond au cas d'un test refait à l'identique -ex. le test 2 est une simple mise à jour du test 1 ; les résultats s'affinent- ; (2) le *recouvrement partiel* où des différences et des similitudes existent entre les tests et (3) la *complémentarité* où les tests relèvent de catégories de problèmes différentes. Les tests très fréquents se justifient dans deux cas selon Thomke et Bell : lorsqu'ils sont partiellement recoupés et quand leur coût de réalisation est faible. Au contraire, un test de type « recouvrement total » sera moins fréquent parce que plus fiable. Si les tests séquentiels ne sont que des raffinements successifs d'un même test originel (cas du recouvrement total), il vaut mieux procéder à quelques gros tests fiables. Reinertsen (1997) parle à leur propos de « big killer tests ». Ces tests sont indépendants les uns des autres. Ils sont coûteux mais facteur d'apprentissage. Ces gros tests, qui auront plutôt lieu à la fin des développements, se justifient économiquement lorsqu'il y a peu d'incertitudes à résoudre sur les projets.

L'architecture même du produit développé influence la performance de prototypage. Ainsi, une architecture modulaire réduit le coût du test comparativement à une architecture intégrée à condition que les concepteurs connaissent bien les fonctionnalités des éléments ou des modules et leurs interactions (Loch et alii, 2001). A contrario tester un grand nombre de modules dont les fonctionnalités clients sont mal connues explose le nombre des combinaisons et donc le coût de prototypage.

4.3 L'interprétation des résultats des tests

In fine, c'est l'interprétation des résultats tirés des tests des prototypes qui créent de la valeur. Une organisation peut parfaitement produire des résultats pertinents très en amont des projets, faut-il encore que les concepteurs les assimilent et les interprètent. Le degré d'implication des utilisateurs finaux est un facteur d'interprétation déterminant. Boehm (1991) (cité in Thomke et Bell, 2001) montre que, dans le cas du développement de projets informatiques, la stratégie *d'implication* des clients à chaque vague de prototypes est plus performante qu'une stratégie dite *de spécification* où les concepteurs n'interagissent pas avec les utilisateurs finaux pour interpréter les résultats des versions prototypes. Plus précisément, la performance du produit est la même dans les deux stratégies, mais l'effort de développement mesuré notamment en lignes de codes informatiques est réduit dans la stratégie d'implication client. Cette interaction avec l'utilisateur final permet d'interpréter au plus juste les résultats des versions prototypes.

Thomke (2001), de son côté, montre que la qualité de l'interprétation des tests tient à la composition des équipes projets. Les prototypes sont bien des machines à révélation sur le produit à venir. Plus les mondes professionnels des concepteurs et des utilisateurs se confrontent autour des prototypes, plus les prototypes parlent. Finalement, la qualité d'un test ou la performance de prototypage ne se mesure ne se définit pas en soit. Elle dépend du contexte organisationnel dans lequel elle a lieu.

5. Conclusion

« L'innovation ne peut simplement être expliquée en termes de circuits d'informations et de résolution de problèmes. Elle se définit davantage comme un processus par lequel l'organisation crée et définit des problèmes puis développe de nouvelles connaissances pour les résoudre » (Nonaka, 1994). Les prototypes participent de cette création de connaissances.

L'exploration des problématiques managériales autour des prototypes soulève d'autres questions encore. Ainsi, la virtualisation et l'évolution des métiers de la conception (designers, moulistes, fondeurs, plasturgistes, architectes...) constituent un champ d'interrogations pour la gestion des ressources humaines en particulier. Les relations inter-entreprises sont directement impactées par le développement des maquettes numériques et plus généralement par tous les moyens qui permettent de concevoir à distance. Quels types de partenariats mettre en place ? Comment organiser la logistique des composants des prototypes dans les grandes industries ? La livraison d'une usine d'assemblage de prototypes en juste à temps des pièces (outillages et composants) est conditionnée par la ponctualité et la fiabilité des partenaires. Comment s'assurer de la conformité des pièces livrées ou de la réactivité des fournisseurs face aux

modifications à réaliser sur les prototypes ? Comment organiser la traçabilité des pièces prototypes qui prend en compte les modifications successives pour une même référence ? En poursuivant les interrogations de fabrication, on peut très bien passer des moyens de réalisation des prototypes à la fabrication en petite série. Ainsi, le « rapid manufacturing » peut emprunter au prototypage rapide ses techniques pour produire des pièces finies en petites ou moyennes séries. Le secteur médical, notamment au travers de la fabrication de prothèses, offre une bonne illustration de ces potentialités. L'automobile, l'aéronautique, l'électroménager constituent autant d'applications possibles. Aujourd'hui peu développés, ces apprentissages en production des techniques du prototypage présentent des avantages en termes de délais de développement raccourcis (pas de phase de réalisation d'outillage par exemple), de prise en compte de la variété du produit jusqu'à la fabrication sur mesure. Parce que les prototypes représentent une création de valeur future pour l'entreprise, ils peuvent aussi intéresser les analystes financiers qui les évalueraient comme des options réelles. Naturellement, sur toutes ces problématiques, les terrains sont rares et rétifs. C'est aussi aux chercheurs de faire de l'entrisme.

6. Bibliographie

- Abel M. J. (1993), « Experiences in an exploratory distributed organization », *Readings in Groupware and Computer-Supported Cooperative Work (CSCW)*, Assisting human-human collaboration, Ronald M. Baecker Editor, pp. 792-802.
- Abramovici M. et Bancel-Charensol L. (2004), « How to Take the Customers into Consideration in Service Innovation Projects ? », *The Service Industries Journal*, vol 24, n° 1, janvier, pp. 56-78.
- Aggeri F. et Segrestin B. (2002), « Comment concilier innovation et réduction des délais ? Quelques leçons tirées du développement de la Laguna 2 », *Gérer et Comprendre*, n° 67, pp. 30-42.
- Allen T. J. (1966), « Studies of the problem solving process in engineering design », *IEEE Transactions Engineering Management*, EM 13 (2), pp. 72-83.
- Ballot E. (1997), « La simulation industrielle : aide réelle ou virtuelle à la prise de décision », *Revue Française de Gestion Industrielle*, vol. 16, n° 1, pp. 21-38.
- Bernard A. et Taillandier G. (1998), *Le Prototypage rapide*, Editions Hermès.
- Boehm B. (1991), *Software Engineering Economics*, Prentice Hall.
- Bohn R.E. (1987), « Learning by experimentation in manufacturing », Working Paper HBS, n° 88-001, Boston, MA.
- Bonhomme Y. et Midler C. (1999), « Les outils de gestion en portefeuilles de projets dans la pharmacie », *Séminaire ressources technologiques, Les Annales de l'École de Paris du Management*, pp. 127-136.
- Chapman W. et Bahill T. (1987), « Design, Modeling and Prototyping », in Lock. Dennis (edited by), *Project management Handbook*, Aldershot, Hants, England : Gower Technical Press, chap. 13.8.

- Clark K.B. et Wheelwright S. C. (1992), *Revolutionizing Product Development, Quantum Leaps in Speed, Efficiency, and Quality*, The Free Press, Macmillan, Inc., New York.
- Clark, K. B. et Fujimoto T. (1991), *Product development performance : strategy, organization and management in the world auto industry*, Harvard Business School Press, Boston, Massachusetts.
- Cusumano M. A. et Selby R. W. (1995), *Microsoft secrets*, The Free Press
- Droz D. (1992), « Prototyping to managing product development », *Journal of Business Strategy*, 13, n° 3, pp. 34-38.
- Garel G. (1994), « Réduction du temps de conception, concourance et savoirs professionnels : le cas de l'emboutissage dans les projets automobiles », Thèse de Doctorat de gestion de l'Ecole polytechnique.
- Gawer A. (2000), *The organization of platform leadership : an empirical investigation of Intel's management processes aimed at fostering complementary innovation by third parties*, PhD M.I.T, Boston, february.
- Hatchuel A., Le Masson P. et Weil B. (2002), « Innovation / projet : des liens complexes », *La Cible, la revue du management de projet*, n° 88, pp. 1-4.
- Iansiti M. (1998), *Technology integration : making critical choices in a dynamic world*, Boston, Mass. : Harvard Business School Press.
- Imai K. H., Nonaka I. et Takeuchi H. (1985), « Managing the new product development process : how japanese compagnies learn and unlearn », in Clark K. B., Hayes R. H, Lorenz C., *The uneasy alliance*, Harvard Business School Press, pp. 337-375.
- Kelley T. (2003), « La création de prototypes ; un raccourci pour l'innovation », *Magazine Design Management*, n° 2, janvier, pp. 4-9.
- Jeantet A. et Boujut J. F. (2001), « Développement de processus coopératifs en conception de produits et évolution des outils de l'ingénieur », *Management de l'innovation Management de la connaissance*, H. Dumez coord., L'Harmattan, Paris, pp. 139-168.
- Lampel et Mintzberg, H. (1997), « La querelle du standard et du sur-mesure », *Expansion Management Review*, pp. 37-44, version originale : « Customing customization », *Sloan Management Review*, Fall.
- Lamy S. J. (1999), « De l'A340 500/600 vers l'A3XXX Retour d'expérience sur l'introduction du concurrent engineering », Mémoire de DEA, Sous la direction de C. Midler et G. Garel, Université de Marne la vallée, ENPC.
- Latorre S. (2002), « Innovations en technologies et méthodes de conception-production », in *Le Management de l'innovation*, A. Cadix et J.M. Pointet coord., Eyrolles.
- Le Masson P. (2001), « De la R&D à la RID : modélisation des fonctions de conception et nouvelles organisations de la R&D », Thèse de doctorat ENSMP CGS.
- Loch C. Terwiesch C. et S. Thomke (2001), « Parallel and Sequential Testing of Design Alternatives », *Management Science*, 47, n° 5, May, pp. 663-678.

spécifiquement un travailleur qui ne fait affaire qu'avec un seul fournisseur de produits. Cependant, nous pouvons généraliser notre approche du problème au cas où plusieurs fournisseurs approvisionnent le travailleur autonome. Ce dernier se retrouve parfois à occuper un poste qui est nouveau pour lui. Il est possible que le travailleur effectuait la distribution des produits en tant qu'employé de l'entreprise concernée, avant de devenir autonome. Mais, étant donné les restructurations des entreprises qui veulent plus qu'auparavant se départir de certaines de leurs fonctions, l'entreprise n'est peut-être plus intéressée par la responsabilité directe de la distribution. Elle vend donc ses routes de distribution à ses employés. Ceux-ci, s'ils acceptent cette nouvelle fonction, se retrouvent du jour au lendemain avec une responsabilité accrue, dans la mesure où ils deviennent maintenant des gestionnaires préoccupés autant de la qualité du travail que des coûts. Ils doivent décider eux-mêmes, par exemple, des routes de distribution à suivre et des horaires des visites des clients, ce qui n'était pas le cas auparavant. Le travailleur autonome est donc rémunéré en fonction de la quantité de marchandise qu'il écoule auprès des clients sans que son fournisseur ne tienne compte des frais qu'il engage.

Dans le contexte qui nous préoccupe, les frais variables du travailleur autonome sont surtout du côté des frais liés au transport. Ces frais peuvent être dépendants des distances parcourues et/ou des temps de parcours. Il existe souvent un lien entre les deux. Dans un milieu urbain, les coûts de transport sont plus souvent tributaires des temps de parcours. Le trafic plus intense, les travaux sur certaines rues ou les accidents plus fréquents font qu'il serait alors préférable de privilégier la minimisation des coûts reliés au temps de parcours.

Dans un milieu plus rural ou moins fortement urbanisé, les temps de parcours varient peu d'un jour à l'autre ou d'une semaine à l'autre. Dans ce cas, le fait de minimiser les coûts reliés aux distances parcourues aurait un impact plus grand sur la réduction des coûts de transport. Nous avons choisi de traiter cette situation. Il est à remarquer que si nous avons minimisé les temps de parcours au lieu des distances, cela n'aurait pas modifié notre approche de résolution.

Le travailleur autonome œuvrant dans le secteur agro-alimentaire ne connaît pas toujours à l'avance les quantités de produits qu'il devra livrer chez chaque client. Il peut avoir une bonne idée, selon son expérience passée, des quantités habituellement consommées chez chaque client mais il n'a aucune certitude. Dans la plupart des cas, son travail consiste à se présenter chez le client, à vérifier ce qu'il reste sur les tablettes ou dans l'entrepôt et à combler les besoins en remplissant les tablettes. D'une fois à l'autre, il ne sait donc pas quel sera son temps d'intervention chez les clients, ni si les stocks contenus dans son camion seront suffisants pour combler les besoins de ses clients. Il y a donc un élément d'incertitude important dans ce problème. Puisque le travailleur est généralement une personne d'expérience, nous avons choisi, pour les besoins de cet article, de ne pas prendre en considération l'aspect stochastique du

problème. Il nous semblerait cependant nécessaire d'en tenir compte éventuellement et nous nous proposons de le faire lors de travaux futurs.

Ainsi, le travailleur autonome se rend tous les matins pour s'approvisionner à l'entrepôt de son fournisseur. Pour notre application, la journée de travail se divise en deux parties puisqu'il s'accorde une heure pour son repas du midi. Il revient le soir à l'entrepôt où il laisse son camion. Une journée de travail débute généralement à 5 h à l'entrepôt. Il y a une pause pour le déjeuner après sa visite à l'entrepôt. Il y a également une pause repas du midi entre 12 h et 13 h mais, selon les clients qu'il a rencontrés le matin, cela peut être plus ou moins durant cet intervalle de temps. Il retourne à l'entrepôt en fin d'après-midi entre 16 h et 17 h 30. Le samedi est une journée où il a moins de clients à desservir et, par conséquent, il termine sa journée de travail à 15 h au plus tard. Le lundi et le dimanche sont des journées de congé. Évidemment, les heures mentionnées sont à titre indicatif puisqu'en tant que travailleur autonome, il peut, si nécessaire, travailler plus tard ou terminer moins tard selon les besoins ponctuels. Les retours à l'entrepôt durant une même journée sont très rares. Nous n'en tiendrons pas compte.

Le problème est donc de déterminer les trajets quotidiens pour la livraison des produits aux divers clients du travailleur autonome de façon à minimiser les distances parcourues.

3. Contraintes et données du problème

Afin de résoudre le problème brièvement décrit dans la section précédente, nous devons considérer certaines contraintes auxquelles doit faire face le travailleur autonome. Il faut aussi déterminer le type de données dont nous aurons besoin et nous devons nous assurer qu'elles sont les plus exactes possibles.

3.1 Contraintes

Nous considérons deux types de contraintes.

Contraintes liées à la clientèle

Le temps d'intervention : Pour certains points de livraison, le temps d'intervention comprend les temps de déplacement du camion à l'entrée du magasin, de la visualisation des produits manquants, du retour au camion, de la prise de produits dans le camion, du retour dans le magasin, du remplissage du bon de commande, du rangement sur les rayons et du retour au camion pour reprendre la route.

Pour d'autres points de livraison, il ne faut pas prendre en considération le décompte des produits manquants et la mise en rayon puisque le travailleur connaît alors la quantité des

produits à livrer et le personnel du point de livraison range lui-même les articles livrés. Cette situation est de plus en plus rare.

Le temps d'intervention dépend, dans une certaine mesure, de la catégorie à laquelle appartient le client. Les clients plus importants du type « Club d'achat » ou achat en gros et supermarché peuvent avoir un temps d'intervention allant jusqu'à une heure. Les plus petits clients du type épicerie ou dépanneur ont plutôt un temps d'intervention qui tourne autour de quinze minutes.

La fréquence des livraisons : Les clients peuvent recevoir la visite du travailleur autonome entre une et cinq fois par semaine. Certains clients sont donc visités tous les jours du mardi au samedi. Dans notre cas, les clients devant être visités deux fois par semaine, le sont le mardi et le vendredi. Ceux qui reçoivent des livraisons quatre fois par semaine, sont visités les mardi, mercredi, jeudi et samedi. Pour ce qui est des ravitaillements de une et trois fois par semaine, le travailleur autonome a entièrement le choix quant aux jours où il visitera ces clients. Habituellement, ces derniers s'accommodent fort bien de cette façon de faire.

Les horaires de visite : Certains clients ont des exigences du point de vue des horaires de visite. Ainsi, certains magasins souhaitent être visités le matin ou l'après-midi avant telle ou telle heure. Dans des cas plus particuliers, les clients imposent des heures de visite très strictes. Le travailleur autonome n'a donc pas le choix de tenir compte de ces requêtes pour effectuer ses livraisons.

Contraintes liées au travailleur autonome

Les repas : Le travailleur autonome désire prendre son repas du midi entre approximativement 12 h et 13 h à la maison. Son domicile devient alors un point de visite, de la même façon que ses clients. Il prend environ une heure pour ce repas.

Pour le déjeuner, il préfère le prendre entre 6 h et 6 h 30 c'est-à-dire après qu'il ait rempli son camion à l'entrepôt du fournisseur. Ce repas dure environ une demi-heure.

Les heures de repas dépendent principalement de ses livraisons. Il privilégie de bien desservir ses clients au moment désiré plutôt que de prendre ses repas à heure fixe.

Le travail : Nous avons déjà mentionné que la journée de travail débute à 5 h et se termine entre 16 h et 17 h 30 sauf le samedi où la journée se termine avant 15 h.

3.2 *Données*

La description des contraintes nous indiquent quelles sont les données dont nous aurons besoin pour déterminer les trajets quotidiens du travailleur autonome effectuant ses livraisons.

Nous devons connaître les distances entre les divers points de livraison, l'entrepôt, le domicile du travailleur autonome ainsi que le lieu de son déjeuner. Pour ce faire, nous avons travaillé avec un travailleur autonome qui a amassé ces données pour nous. Il n'avait pas d'idée précise lui-même des distances réelles qu'il parcourait. Cela lui a donc permis d'en prendre conscience en les notant.

Nous lui avons également demandé de déterminer les temps de parcours bien que nous n'avons pas utilisé ces données lors des tests numériques. De plus, les temps d'intervention ont également été notés et ce, pour plusieurs semaines, afin de vérifier si on pouvait déceler une moyenne de temps d'intervention pour chaque client. Ces temps pouvaient être assez variables tout en étant dans un même ordre de grandeur. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé de considérer une moyenne des temps d'intervention.

Les temps d'intervention n'ont cependant pas été directement utilisés dans la résolution du problème. En effet, lors de la résolution du problème, nous avons choisi de déterminer la séquence des clients à visiter pour un jour donné sans tenir compte, de façon explicite, des heures de livraison imposées par certains clients ni des temps d'intervention. Ce choix nous a permis de faciliter la résolution du problème. De plus, nous avons noté que les clients qui exigeaient des heures précises de livraison souhaitaient tous recevoir la visite du travailleur autonome très tôt le matin. La séquence de visite pour ces clients s'imposait, de par leurs exigences respectives, sans que nous ayons à résoudre quelque problème que ce soit. C'est un peu comme si la séquence de visite pour ces clients avait été imposée. De plus, le travailleur autonome étant assez souple quant à ses heures de repas et de fin de journée de travail, il n'était pas essentiel de tenir compte explicitement des temps d'intervention. En effet, l'imprécision des temps d'intervention nous empêche de fixer une plage horaire rigide pour la période du dîner. Par exemple, si tous les clients visités le matin prenaient le double du temps d'intervention estimé, le travailleur autonome ne pourrait prendre son repas du midi entre 12 h et 13 h. Le modèle mathématique que l'on peut trouver en annexe comprend tous les aspects du problème, y inclus le respect des temps de déplacement et des temps d'intervention et les contraintes d'élimination de sous-tours.

Un des problèmes que nous n'avons pas analysé en profondeur est celui de l'affectation des clients aux journées de distribution, soit du mardi au samedi. La fréquence des visites des clients étant imposée par le fournisseur et le nombre de clients à visiter hebdomadairement relativement élevé facilitait grandement l'affectation des clients. La répartition des clients en

fonction des journées de distribution a été relativement facile. Par contre, rien ne nous prouve que nous ne pourrions trouver une meilleure répartition. L'utilisation de l'outil *Hierarchical Cluster Analysis* du logiciel SPSS, par exemple, pourrait nous être fort utile pour valider ou améliorer notre affectation initiale des clients.

4. Approches de résolution

Le problème de détermination des trajets quotidiens de livraison est un problème qui s'apparente à celui du commis voyageur. Tel que décrit dans la section précédente, nous avons mis de côté les contraintes qui auraient rendu le problème encore plus complexe à résoudre, sans que cela ne nous empêche d'obtenir des solutions fort valables. Il est bien connu que le problème du commis voyageur est un problème difficile car c'est un problème NP-complet. Nous ne prétendons pas pouvoir le résoudre de façon exacte sauf pour les petits problèmes du travailleur autonome.

Trois approches ont été prises en compte. Ces trois approches ont été considérées pour différentes raisons. La première approche est une approche graphique facile et naturellement utilisée par le travailleur autonome. La seconde est une heuristique basée sur celle de Lin et Kernighan (1973). Finalement, la dernière est la résolution optimale à l'aide du logiciel CPLEX. Rappelons que la solution proposée au travailleur autonome doit être obtenue par une méthode et un outil simple à utiliser et évidemment peu coûteux. Cela a guidé notre choix d'une approche définitive de méthode de résolution du problème.

- Approche graphique : Cette approche en est une *ad hoc* où, à l'aide d'un plan, nous situons les clients graphiquement et nous tentons de déterminer une séquence de visites qui soit la plus courte possible en terme de distances parcourues. Il n'y a aucune garantie d'obtention de la solution optimale. Elle reflète la façon de faire du travailleur autonome qui prend le temps de consulter un plan. C'est l'approche la moins coûteuse mais la moins précise. Cependant, pour de petits problèmes, elle pourrait être compétitive en terme d'efficacité. Les résultats numériques de la section suivante nous indiquent que, dans notre cas, les résultats de l'approche graphique sont plus élevés.
- Approche heuristique : Comme nous le mentionnons plus haut, c'est une heuristique qui ne garantit pas l'obtention de la solution optimale mais qui donne de très bons résultats. Elle fonctionne par étapes. À partir d'une tournée initiale, nous tentons d'en améliorer la distance totale en échangeant certaines arêtes. Nous décrivons cette heuristique plus en détails dans la prochaine sous-section.
- Méthode exacte : Cette dernière approche consiste tout simplement à résoudre de façon exacte le problème de détermination des trajets quotidiens, modélisé comme un problème

de programmation linéaire en nombres entiers. Le logiciel que nous avons utilisé est CPLEX. Ce logiciel est connu pour sa vitesse de résolution. Nous l'avons utilisé afin de valider et comparer les résultats que nous avons obtenus à l'aide de l'heuristique. La raison pour laquelle nous n'avons pas retenu cette approche et ce logiciel pour le cas du travailleur est le coût d'achat du logiciel trop élevé pour le travailleur. De plus, son utilisation aurait nécessité une formation spécifique qui dépassait la formation de base du travailleur.

Nous avons utilisé comme approche heuristique, pour résoudre notre problème de tournée, l'approche proposée par Lin et Kernighan (1973). Bien que cette approche date de plusieurs années, elle nous est apparue comme étant efficace et simple à implanter et à utiliser. La méthode de Lin et Kernighan ne garantit pas nécessairement l'obtention d'une solution optimale mais elle donne des résultats très compétitifs et qui sont souvent optimaux pour plusieurs problèmes. Puisque nous devons traiter des problèmes de taille relativement petite, cette méthode de résolution est tout à fait appropriée.

C'est une méthode qui se base sur les méthodes d'échanges puisqu'il s'agit, à partir d'un tour initial, d'améliorer la tournée en échangeant des arêtes pour d'autres qui permettent de réduire la longueur de la tournée. Le choix des arêtes à échanger lors du processus de résolution constitue l'aspect le plus important et le plus délicat. Lors d'un échange d'arêtes, il faut que des économies aient été générées en terme de longueur de la tournée à parcourir. À partir d'une arête nouvellement ajoutée au tour, on répète le processus afin de déterminer une arête joignant une des extrémités de l'arête nouvelle qui pourrait être retirée pour améliorer la longueur du tour. Il s'agit donc d'un processus itératif qui se répète tant et aussi longtemps que chaque nœud ou chaque ville devant faire partie du tour n'a pas été considéré comme ville de départ ou si aucune amélioration ne peut plus être obtenue. Puisque chaque point de livraison doit être considéré comme point de départ, plus le nombre de nœuds est élevé, plus le temps de résolution sera élevé. De plus, la qualité de la solution peut dépendre de la tournée initiale. Avec le problème de détermination des trajets quotidiens du travailleur autonome, nous demeurons dans une limite fort acceptable quant à la taille des problèmes traités.

Pour plus de détails sur la description de la méthode heuristique pour résoudre le problème du commis voyageur ou le problème de tournée, nous invitons les lecteurs intéressés à consulter l'annexe II.

5. Résultats numériques

Le problème de détermination des séquences des visites des clients que doit résoudre un travailleur autonome est un problème de petite taille. La complexité de la résolution d'un tel problème est donc limitée. Le défi réel auquel nous devons faire face consiste à trouver une

méthode de résolution rapide, efficace et surtout peu coûteuse. Tout logiciel spécialisé dans la résolution de problèmes de programmation linéaire en nombres entiers était donc exclu comme outil que le travailleur aurait pu utiliser, pour des raisons de coûts et non pas d'efficacité. Nous avons cependant résolu nos problèmes à l'aide du logiciel CPLEX afin d'en comparer les résultats avec ceux obtenus par la méthode graphique et surtout par l'heuristique. Des problèmes de différentes tailles (5, 10 et 15 nœuds ou clients) ont été générés aléatoirement. Pour chaque taille, cinq problèmes ont été testés. Ils ont tous été testés à l'aide des trois approches décrites dans les sections 3 et 4. Le tableau 1 présente les résultats quant aux tours et aux longueurs des tournées obtenus avec les trois approches.

Problème	Méthode cartographique	Algorithme	Programmation linéaire
A-5	24	21	21
B-5	21	21	21
C-5	22	22	22
D-5	28	28	28
E-5	35	32	32
A-10	30	30	30
B-10	32	29	29
C-10	32	31	31
D-10	40	31	31
E-10	38	38	38
A-15	40	34	34
B-15	41	35	35
C-15	33	32	32
D-15	39	34	33
E-15	40	34	33

Tableau 1 : Longueurs des tournées selon trois approches

Nous constatons que l'approche graphique, qui reflète comment le travailleur autonome peut s'y prendre s'il le fait de façon un peu plus rigoureuse pour déterminer les séquences de ses visites, est l'approche la moins efficace. Elle donne les moins bons résultats et exige tout de même assez de temps pour obtenir une tournée. Nous avons pu valider les résultats obtenus par l'approche heuristique en examinant la solution optimale fournie par CPLEX. Pour $n=5$ et $n=10$, nos résultats sont optimaux même si les tournées peuvent varier. Cela indique qu'il existe plus d'une solution optimale à ce problème. Notons, par exemple, que la tournée obtenue pour le

problème A10 à l'aide de l'heuristique est 1, 29, 28, 50, 5, 9, 36, 57, 6, 39, 26 (les numéros sont associés à des clients), pour une distance totale de 30. Celle obtenue avec CPLEX est 1, 26, 39, 6, 57, 36, 9, 5, 50, 28, 29, pour la même distance. Notre heuristique réussit à résoudre les différents problèmes en une fraction de seconde. Elle est donc efficace et exacte. Pour $n=15$, CPLEX a réussi à trouver un meilleur tour que l'heuristique pour deux problèmes (D15 et E15) ; la différence est de un kilomètre. Il semble évident que plus la taille des problèmes augmente, plus l'heuristique risque d'être moins performante que CPLEX. Dans notre cas, les tailles des problèmes étant relativement petites, l'heuristique demeure un choix approprié comme méthode de résolution.

Pour le travailleur autonome, l'heuristique représente donc une alternative intéressante puisqu'elle ne nécessite pas l'achat de logiciels coûteux, ni d'un ordinateur nécessitant un espace mémoire imposant. Dans la section suivante, nous présentons l'interface qui facilitera l'utilisation de cette approche heuristique pour résoudre le problème de distribution pour un travailleur autonome.

6. Présentation de l'interface informatique

L'interface que nous avons utilisée pour résoudre notre problème a été programmée en Delphi. Elle constitue une première ébauche qui demande à être raffinée mais qui est néanmoins tout à fait fonctionnelle. L'utilisateur doit évidemment entrer les données dans une matrice des distances entre les clients. Cela se fait en entrant, un à la fois, les numéros associés aux clients de départ et d'arrivée et en indiquant dans la fenêtre de droite la distance entre les deux. Sur la figure 1, les nombres 24 et 57 des deux premières fenêtres du haut sont des numéros de clients et le nombre 9, à la droite, représente la distance entre les clients 24 et 57. Ces valeurs sont validées en appuyant sur « Ok ». Au fur et à mesure que les numéros des clients sont entrés, ils apparaissent dans la fenêtre du bas à gauche. On peut envoyer tous ces numéros dans la fenêtre du centre et laisser à l'heuristique le soin de choisir un tour initial pour l'ensemble des clients. On peut aussi sélectionner une partie des numéros si l'on désire établir une tournée pour quelques clients seulement. Il est possible également pour l'utilisateur de déterminer le tour initial de son choix. Une fois le tour initial déterminé, il suffit d'appuyer sur « GoAlgo » pour que le processus de résolution soit exécuté afin d'améliorer le tour initial. Lorsque le processus de résolution est complété, le tour trouvé et son coût (ou sa distance selon le contexte d'application) apparaissent au bas de l'écran. Le tour est représenté par la suite ordonnée des clients à visiter. Tout le processus de résolution ne prend que quelques fractions de secondes. Il est également possible pour l'utilisateur d'imposer une ou plusieurs arêtes.

L'interface que nous avons élaborée est donc très facile à utiliser pour une personne ayant une formation restreinte en informatique. Cette personne peut également tester différents *scenarii* de tournées, si elle le désire, et proposer une tournée de départ pour vérifier si elle peut être améliorée. Nous nous proposons, dans les prochains mois, d'améliorer l'aspect visuel et fonctionnel de cette interface pour la rendre encore plus attrayante et simple à utiliser.

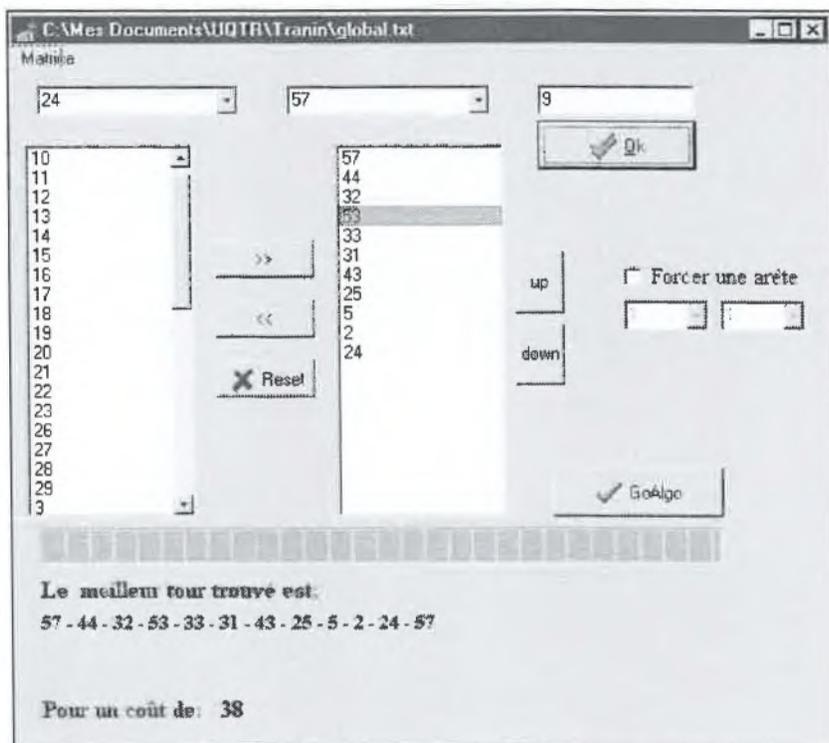


Figure 1 : Interface utilisateur.

7. Conclusion

Les travailleurs autonomes œuvrant dans le secteur de la distribution doivent réduire leurs coûts de fonctionnement s'ils veulent demeurer en affaire tout en étant concurrentiels. Ils disposent de peu de moyens financiers pour les aider en ce sens. Dans cet article, nous avons présenté une méthode simple pouvant aider un travailleur à déterminer les trajets quotidiens des visites de ses clients et ce, à un coût réduit. L'heuristique proposée accompagnée d'un outil informatisé simple d'utilisation convient à ce type de travailleur. Ils permettent d'améliorer la performance logistique du travailleur sans que cela ne soit trop coûteux. De plus, nous avons pu vérifier que nos résultats se comparent fort avantageusement aux solutions exactes pour des problèmes de petites tailles.

8. Bibliographie

- Gutin, G. (1999), «Exponential Neighbourhood Local Search for the Traveling Salesman Problem», *Computers and Operations Research* 26, N° 4, 313-320.
- Huang, C.P. Alidaee, B. et Johnson, J.D. (1999), «A Tour Construction Heuristic for the Traveling Salesman Problem», *The Journal of Operational Research Society* 50, N° 8, 797-809.
- Khan, W.A., Hayhurst, D.R. et Cannings, C. (1999), «Determination of Optimal Path under Approach and Exit Constraints», *EJOR* 117, No 2, 310-325.
- Lawler, E.L., Lenstra, J.K., Rinnooy Kan, A.H.G. et Shmoys, D.B. (1985), *The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization*, John Wiley and Sons, 473 p.
- Lin, S. et Kernighan, B.W. (1973), «An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem», *Oper. Res.* 21, 498-516.
- Pearn, W.L. et Chian, R.C. (1998), «Improved Solutions for the Traveling Purchaser Problem», *Computers and Operations Research* 25, N° 11, 879-885.