

COUPLAGE ENTRE LE QFD ET LA SIMULATION POUR LA CONCEPTION DE SYSTEMES DE PRODUCTION

Denis Gien, Sylvie Jacquart, Benoît Buffet, Franck Hervieu*

Résumé. - Cet article s'intéresse à la complexité du montage automobile générée par la diversité des pièces. Nous présentons la démarche de gestion de cette complexité adoptée actuellement en usine et en conception par un constructeur automobile : « une démarche sociotechnique ». Un résultat de l'analyse de cette démarche montre les limites de l'intervention actuelle et la nécessité d'accroître l'efficacité en intervenant plus en amont de la production, au sein du processus de conception. Une prise en compte de la complexité en conception nécessite le développement d'une expertise en la matière et une coordination entre les différents métiers qui concourent à la conception.

Mots-clés : Diversité, Complexité, Production, Conception, Sociotechnique.

1. Introduction

En raison de la complexité des systèmes de production, le concepteur dispose rarement d'une vue d'ensemble, simultanément concise et précise. Une approche qualitative est utile en phase initiale, pour définir les grandes lignes du projet et indiquer les directions à suivre pour aboutir aux objectifs. L'évaluation quantitative des performances est indispensable pour préciser les ressources matérielles et humaines à mettre en œuvre et la configuration exacte du système. Une démarche de conception doit intégrer ces deux aspects afin d'être efficace.

* Laboratoire d'informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes, Université Blaise Pascal, Institut Français de Mécanique Avancée, Campus des Cézeaux, BP 265, F 63175 AUBIERE, Email : gienCwifma.fr, jacquart@ifma.fr.

Nous proposons dans cet article d'exploiter des informations qualitatives pour renseigner les modèles qualitatifs sur lesquels seront basées les activités de reconception du système considéré ou de conception d'un nouveau système similaire. Le support de la phase qualitative est le *déploiement de la qualité* connu sous les initiales QFD (Quality Function Deployment). L'évaluation quantitative, essentiellement basée sur des critères de quantités et de délais, est construite sur la simulation. Le couplage est obtenu en réalisant un plan d'expérience, puis en analysant la corrélation entre les moyens mis en œuvre et les objectifs virtuellement atteints.

2. Couplage entre QFD et simulation

2.1 Conception d'un système de production

L'ingénierie des systèmes de production s'intéresse à la modélisation en vue de concevoir, puis de mettre en œuvre des installations industrielles parfaitement conformes aux objectifs stratégiques (Ladet 1995). La plupart des travaux sont orientés vers la représentation d'un système existant ou en projet afin d'en assurer la spécification, la validation ou l'optimisation (Koonce 1996) (Macedo 1999). Le but visé est souvent la reconception radicale du système de production pour réaliser un progrès essentiel. Les méthodes et les outils proposés à cette fin sont généralement trop complexes, ce qui limite la généralisation de leur emploi.

En réalité, les performances d'une entreprise ou, plus modestement, d'une unité de production, doivent être améliorées de manière progressive. De petites modifications incrémentales doivent être apportées périodiquement de manière à intégrer les évolutions d'objectifs ou de moyens (Hill 1999). Une réactivité plus proche du terrain est également requise pour l'amélioration continue du système de production. Des méthodes et des outils spécifiques, capables de soutenir ce point de vue, sont alors nécessaires.

Nous nous plaçons dans une stratégie de qualité totale (Yong 1999). Nous souhaitons replacer à son juste niveau l'étape initiale, consistant à définir les besoins effectifs et à les traduire en spécifications, puis en voies de progrès. Bien que la qualité de l'ingénierie détermine celle du système, le soin apporté au début de la conception est encore plus fondamental. Dans de nombreux secteurs, les entreprises sont à des niveaux comparables de qualité d'ingénierie, les différences de succès étant liées à l'adéquation du produit aux besoins des utilisateurs. Cette constatation générale reste vraie au niveau du système de production (Babic 1999).

La démarche débutant par l'expression des besoins, la question essentielle consiste à définir les utilisateurs du système de production. Le client final est évidemment concerné. Lorsqu'une entreprise travaille en sous-traitance, le donneur d'ordres est également un utilisateur qui sollicite la firme et reçoit en réponse une livraison. Les employés participant à la production ou à sa gestion sont des acteurs essentiels qui ne peuvent être ignorés. D'autres utilisateurs tels que les actionnaires, l'État et les partenaires économiques sont évidemment fondamentaux. Dans le cadre de ce travail, nous nous limitons volontairement à des critères facilement mesurables tels que les quantités et les délais de livraison souhaités par le client, les immobilisations de matières premières ou les rebuts redoutés par l'entreprise.

2.2 Déploiement de la qualité

Nous appliquons au système de production (Jacqmart 1998) les méthodes habituellement utilisées pour la conception de produits. La conception d'un système de production passe par plusieurs phases successives. Les objectifs sont d'abord exprimés par les caractéristiques des produits à élaborer (Kasser 1995). Nous en déduisons successivement les procédés de fabrication, l'organisation de l'atelier et enfin son dimensionnement. Une méthode de conception telle que le QFD (Quality Function Deployment) (Revelle 1998) est intéressante car elle permet de cibler et d'améliorer les points clés, contribuant de manière significative aux performances de l'atelier (Akao 1990). Un des principaux éléments du QFD est la maison de la qualité (figure 1) qui regroupe sous une forme compacte et lisible les résultats obtenus (Evbuomwan 1994).

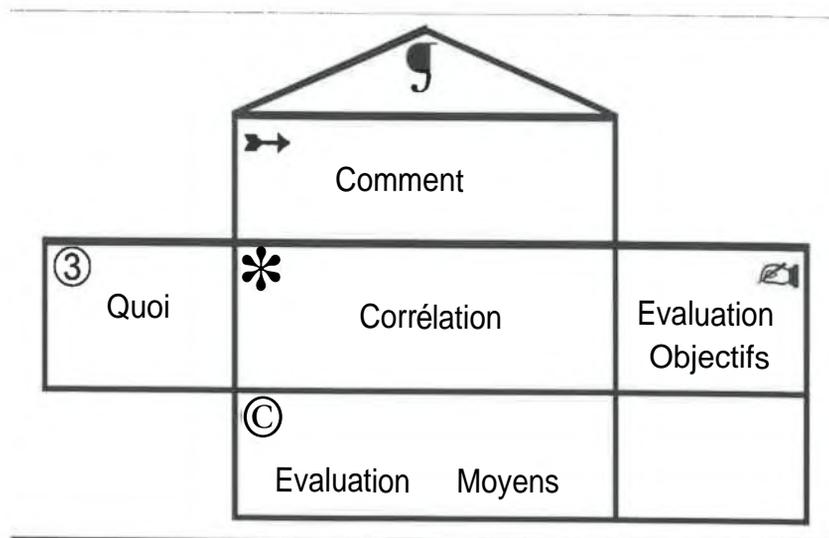


Figure 1 : maison de la qualité

La démarche consiste d'abord à rechercher les objectifs principaux (délais, coût, qualité, environnement) et à les classer ®. Ces critères sont comparés pour différentes installations existantes afin de définir les pistes de progrès ©. Le choix des moyens est obtenu par l'utilisation d'une matrice de corrélation ® associant à chaque objectif les solutions ® les plus appropriées. Les incompatibilités sont également considérées ©. Le bilan global fournit les voies d'amélioration ©.

2.3 Apport de la simulation

Un système de production est un ensemble complexe pour lequel l'évaluation *a priori* des performances est difficilement possible par des méthodes analytiques. Habituellement, en phase finale d'un processus de conception et d'ingénierie, la simulation permet d'évaluer avec précision les performances du système de production avant sa construction ou son amélioration. Les objectifs prévisionnels sont évalués à partir des moyens proposés pour les atteindre. Néanmoins, dans un souci d'efficacité, les concepteurs se limitent trop souvent à la vérification de la solution qu'ils ont déterminée par des techniques de calcul approchées.

Le module de simulation reçoit la définition des moyens choisis ⑥ pour évaluer les résultats qui seront obtenus (figure 2). Ces résultats peuvent alors être comparés aux objectifs. Cette procédure permet d'abord de vérifier la qualité de la conception par rapport aux buts souhaités. Mais l'intérêt principal est de situer également le système relativement au système précédent (dans le cas d'une amélioration) et aux systèmes concurrents.

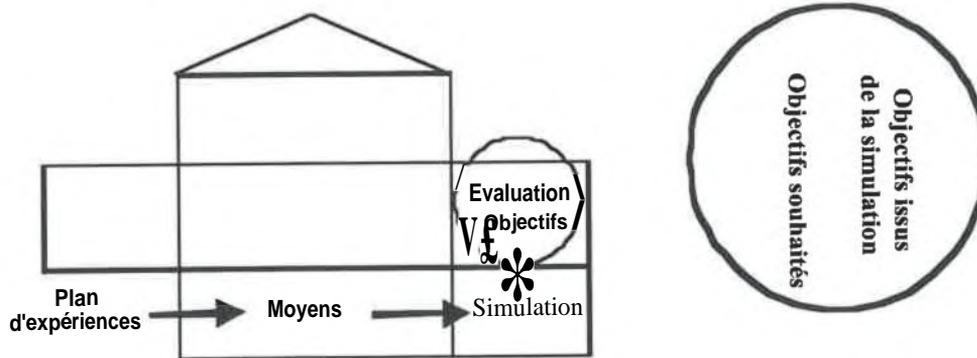


Figure 2 : Évaluation des objectifs par simulation

L'imprécision des données disponibles au niveau de la conception conduit l'ingénieur réaliste à utiliser le module de pilotage et d'analyse statistique associé au logiciel de simulation dont il dispose (Law 1991). Des plans d'expériences permettent de vérifier la robustesse de la configuration retenue (Kleijnen 1996). La recherche de l'optimum sur la surface de réponse conduit aux meilleures performances (Myers 1995). La simulation permet d'évaluer l'ensemble des performances du système de production, délais, qualité et coût (Derriche 1998). Ce type de démarche est efficace mais relativement long pour des systèmes complexes, en raison de la croissance exponentielle du temps de calcul.

Dans notre approche, nous souhaitons déterminer directement les moyens à partir des objectifs en utilisant la matrice de corrélation (figure 3). La simulation n'est utilisée que comme outil de vérification de la pertinence des résultats et, par conséquent, de la qualité de la matrice de corrélation.

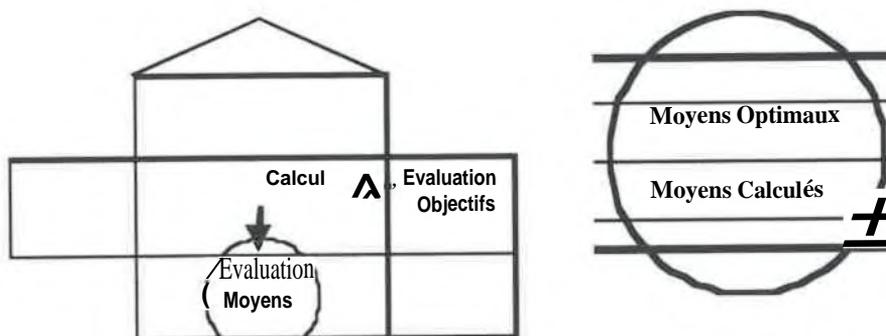


Figure 3 : détermination des moyens directement et par simulation/optimisation

La comparaison peut être effectuée de deux manières :

- dans l'espace des objectifs : les moyens calculés sont utilisés comme paramètres d'une simulation unique dont le résultat est comparé à l'objectif souhaité ;
- dans l'espace des moyens : les moyens calculés sont comparés à ceux qui sont obtenus par une méthode d'optimisation itérative.

Nous nous limitons alors à constater le bien-fondé, ou au contraire l'inadaptation, des coefficients de la matrice de corrélation. La méthode proposée consiste à préserver le calcul direct tout en le faisant bénéficier d'une meilleure précision obtenue par des simulations effectuées en temps masqué.

2.4 *Pondération automatique de la matrice de corrélation*

Afin d'accroître la réactivité de l'entreprise, la (re-)conception du système de production doit être rapide. Pour cela la procédure de recherche directe des solutions doit être efficace dans la plupart des cas. La simulation n'est plus alors exploitée que pour une ultime vérification. Dans ce but, toutes les données, et en particulier les composantes de la matrice de corrélation, doivent être déterminées avec précision. La méthode proposée consiste à exploiter les résultats de simulation pour déterminer ou renforcer les coefficients de corrélation, afin de capitaliser l'expertise acquise au cours des échecs et des succès précédents.

La technique retenue pour définir les simulations à exécuter est la méthode des plans d'expériences minimaux (Taguchi 1988). Elle permet d'obtenir le plus rapidement possible une information pertinente (Dean 1988). Le choix des jeux de paramètres est également guidé par les informations se trouvant dans la maison de la qualité. Le domaine des paramètres peut en effet être limité par les références existantes ou visées avec un léger élargissement rendant l'approche plus robuste.

Les simulations étant réalisées, les résultats sont exploités pour calculer, d'une part les corrélations existant entre les moyens et les objectifs ®, d'autre part les corrélations entre moyens ©. Le calcul ne présente aucune difficulté, mais la mise en forme demande quelques précautions. En effet les résultats sont signés et nous avons choisi de conserver cette caractéristique. Un signe positif (respectivement négatif) devant un coefficient de la matrice signifie qu'une augmentation (respectivement une diminution) du paramètre *moyen* se traduit par une augmentation du paramètre *objectif*. La procédure de calcul est détaillée en annexe (§6.1).

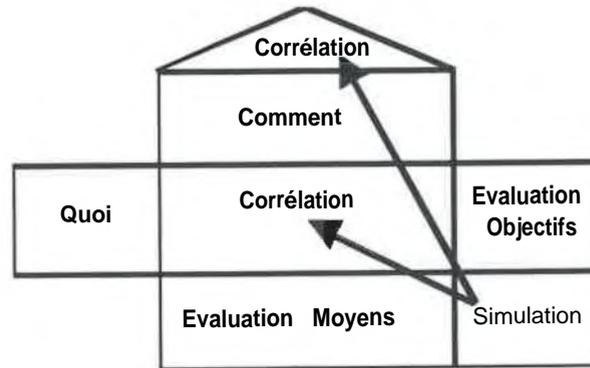


Figure 4 : Ajustement des matrices de corrélation à l'aide des résultats de simulation

3. Application

3.1 *Atelier de fabrication de sous-ensembles mécaniques*

Les concepts présentés ont été appliqués, d'une part à des cas typiques permettant la mise au point de la démarche, d'autre part à un cas industriel pour en vérifier l'intérêt pratique. Nous ne présentons dans cet article qu'une partie de cette dernière application, sensiblement remaniée pour les besoins de l'exposé.

L'atelier présenté a pour objet la fabrication, en sous-traitance, de sous-ensembles mécaniques essentiellement constitués de deux pignons placés dans un carter. Les opérations nécessaires sont l'approvisionnement (matière première, fonderie, visserie), l'usinage des pièces, leur contrôle, l'assemblage de l'ensemble et l'expédition.

3.2 *Le déploiement de la qualité*

La démarche de déploiement de la qualité, appliquée à la conception de l'atelier, débute par la définition des besoins (figure 5). Nous ne considérons que deux utilisateurs du système : le client qui est attentif à la satisfaction de ses commandes (respect des délais, des quantités et de la qualité des livraisons) et le producteur qui souhaite optimiser la rentabilité de ses équipements (optimisation des taux d'utilisation, réduction des rebuts).

Chaque besoin est évalué par son importance stratégique et par son degré de satisfaction actuel. Après comparaison avec d'autres ateliers similaires (concurrents, autres unités du même groupe), un objectif est défini pour procurer à l'atelier un avantage concurrentiel. Un dernier facteur permet d'ajuster l'importance en fonction du potentiel de compétitivité. L'importance de chaque besoin est donc obtenue par un calcul arithmétique simple. La colonne de droite de la matrice donne une présentation graphique qui, dans le cas de l'exemple, met en évidence l'importance accordée au respect et à la réduction des délais.

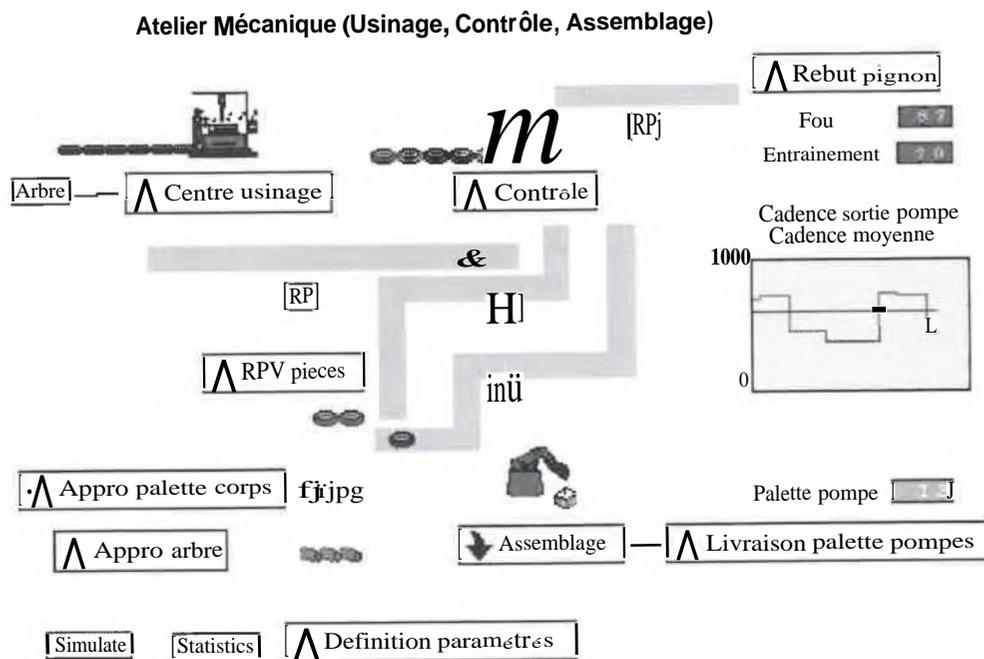
3.3 Détermination des corrélations à partir de la simulation

3.3.1 Réalisation du logiciel

Afin de tester l'approche proposée sur des situations réelles, nous devons réaliser un démonstrateur proche des logiciels utilisés dans les entreprises. Pour la simulation, nous avons retenu Arena (Kelton 1998) pour sa simplicité de mise en oeuvre bien qu'il ne possède pas de module de génération et d'exploitation de plans d'expériences. Pour l'exploitation statistique et la présentation des résultats, Excel est l'outil le plus communément utilisé en milieu industriel. Pour réaliser rapidement une maquette opérationnelle (Buffet 1999), nous avons créé un *colliciel* (*glueware*) basé sur la technologie *ActiveX Automation*. La jonction entre Arena et Excel est assurée grâce au langage Visual Basic for Applications qui est intégré aux deux applications.

3.3.2 Modèle de simulation

Le modèle de simulation a été construit en utilisant, pour plus d'efficacité, les entités standard disponibles sous l'environnement ARENA (figure 6). Dès que les données sont réunies, cette phase demande environ deux jours de travail pour obtenir une représentation suffisamment réaliste. Une attention particulière doit être accordée à l'identification des paramètres des distributions. La durée d'une simulation sans animation est de l'ordre de quelques secondes, ce qui reste compatible avec la phase expérimentale nécessaire à l'évaluation de la méthode.



Le plan d'expériences est construit dans une feuille de calcul, suivant la méthodologie introduite par Taguchi. Il conserve néanmoins un nombre de degrés de liberté suffisant pour permettre le contrôle de la robustesse de l'approche. Pour intégrer les comportements non linéaires et pallier la méconnaissance du domaine de sensibilité des facteurs, un nombre élevé de modalités s'est avéré utile. Dans l'exemple présenté, 3 ou 6 niveaux sont utilisés.

Les simulations sont ensuite répétées automatiquement, en tâche de fond, en suivant le plan d'expériences (figure 7). Les résultats sont écrits dynamiquement dans une seconde feuille. A la fin de l'ensemble des répétitions, les données recueillies sont finalement exploitées pour la détermination des corrélations.

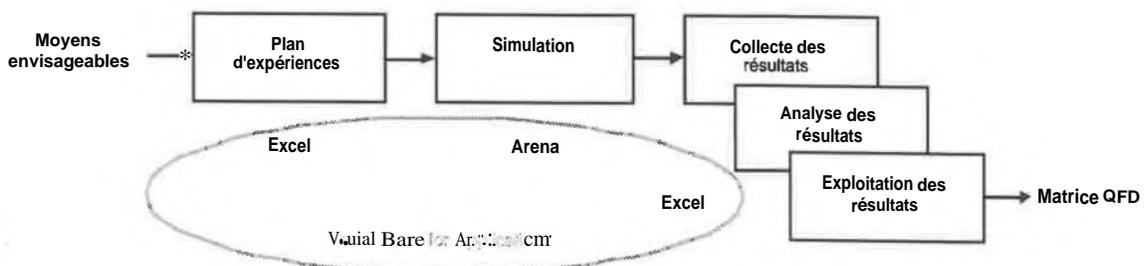


Figure 7 : architecture informatique de l'application

Le test de validité est alors lancé afin que seuls les coefficients significatifs soient transcrits dans une matrice utilisable pour une nouvelle conception (figure 8).

Cette matrice signifie, par exemple, que pour augmenter la production il est nécessaire d'accroître (coefficient +8) la capacité du poste de contrôle qui forme un goulet dans le système de production. Un autre exemple est la diminution des en-cours au niveau du contrôle qui peut être obtenue par une augmentation de la capacité du poste de contrôle (coefficient -5), par une augmentation de la capacité de la cellule d'assemblage (coefficient -6) et/ou par une diminution de la taille maximale imposée pour le stockage après usinage (coefficient +5).

Nous remarquons que, pour deux des moyens d'amélioration, l'importance prend une valeur négative. Cela signifie que les paramètres doivent être modifiés dans le sens contraire à celui qui a été défini initialement par convention. Dans l'exemple, il est préférable que les capacités de production de l'usinage et de l'assemblage soient volontairement limitées pour accroître le niveau de satisfaction des utilisateurs du système. La réduction de la durée de fonctionnement ou de la cadence de fabrication, au niveau de ces postes, conduit effectivement à une synchronisation optimale des flux et, par conséquent, à une exploitation plus efficace de l'atelier. Cette limitation *a priori* permet une meilleure organisation du travail qu'une gestion *a posteriori* suivant une politique de flux tiré.

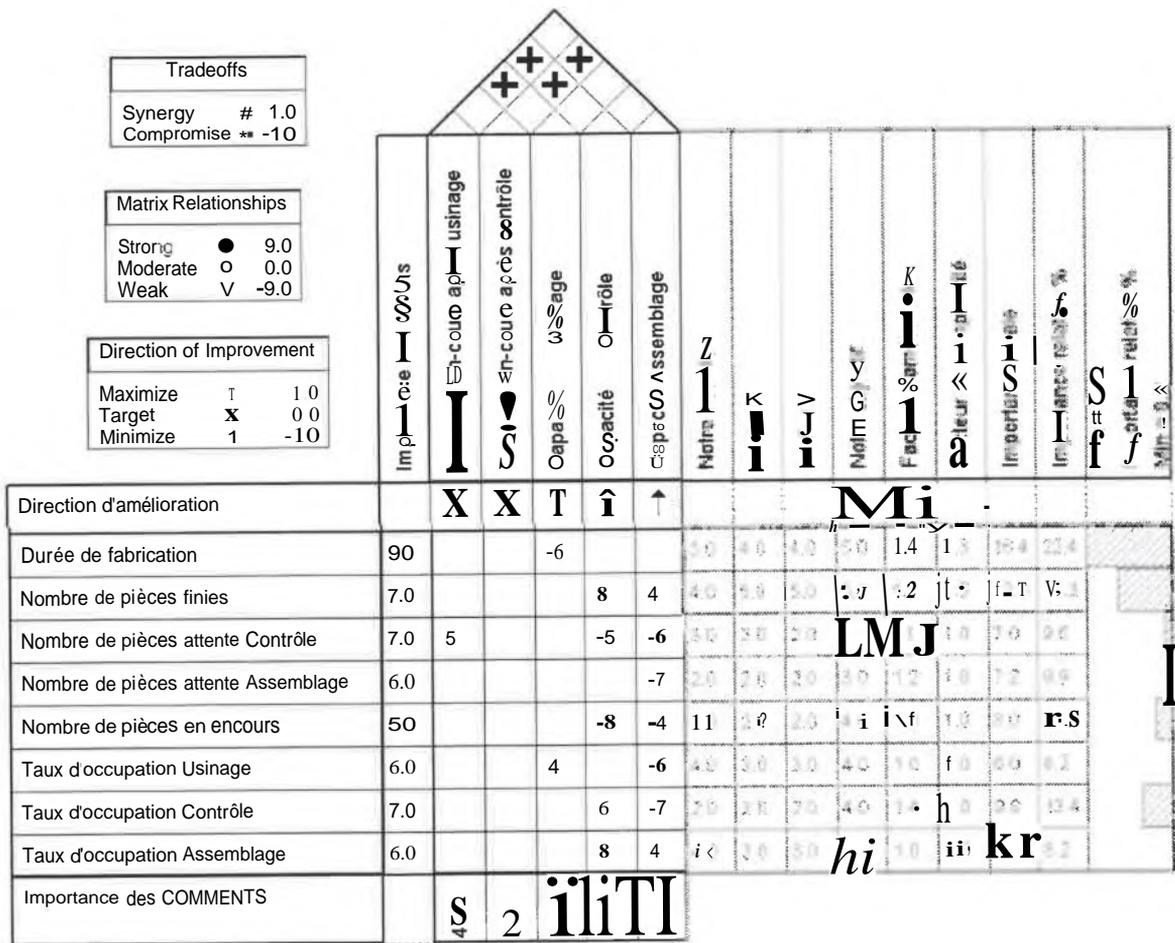


Figure 8 : Matrice QFD

3.3.3 Vérification de la robustesse de l'analyse

Les tests statistiques réalisés au cours du traitement garantissent la robustesse des résultats. Néanmoins nous avons analysé les dispersions, non seulement en exploitant les intervalles de confiance obtenus lors du calcul, mais également en répétant le plan d'expériences lors de l'évaluation de la procédure. Les résultats les plus significatifs coïncident parfaitement avec les estimations obtenues (figure 9). Cependant nous pouvons remarquer que la dispersion varie de manière importante. Cette observation est possible au niveau des matrices, mais ce problème est mieux révélé par la répétition intensive des expériences ainsi que par le tracé graphique. Cette constatation est importante dans la démarche de conception car les poids de la matrice qui permettront une action efficace ne sont pas en réalité les plus importants mais les plus significatifs. Il est en effet toujours préférable de privilégier les solutions les plus robustes, conduisant sûrement aux résultats souhaités, aux actions ayant un effet important mais imprévisible.

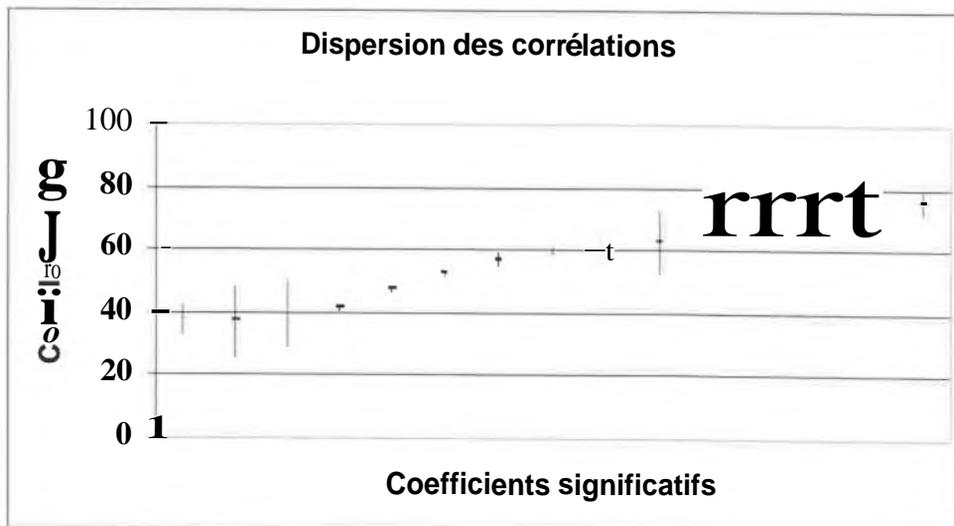


Figure 9 : dispersions sur les coefficients de la matrice de corrélation (99,73%)

4. Conclusion

4.1 Discussion de l'approche proposée

Comme dans toute démarche expérimentale, le domaine de validité des résultats doit être respecté. Cela est d'autant plus sensible que le modèle utilisé est réduit. En effet, en raison des interactions et, dans une moindre mesure, des non-linéarités, les influences des paramètres ne peuvent pas être extrapolées. Nous ne souhaitons pas, pour cette étude, recourir à une représentation plus élaborée car, d'une part nous voulons rester dans l'esprit de la démarche du QFD, d'autre part un modèle plus complexe est également plus sensible à une exploitation mal contrôlée. Nous préférons, au contraire, dès qu'une solution potentielle est envisagée, compléter ou relancer une phase de simulation avec un jeu de paramètres choisi au voisinage des valeurs retenues.

La méthode proposée permet de traiter des modèles de grande taille sans aucun problème. Néanmoins, l'utilisation des résultats dans une démarche de conception n'est possible que si la matrice est directement exploitable par les ingénieurs. En nous basant sur notre expérience, retirée de la pratique de la méthode en milieu industriel, nous situons cette limite à une vingtaine de variables aussi bien pour les objectifs que pour les moyens. Nous obtenons dans ces conditions une centaine de coefficients de corrélation significatifs. Des matrices plus complexes risquent de conduire à un rejet de la méthode ou à une diminution de son efficacité en tant qu'outil d'analyse, de dialogue et de synthèse.

La constatation précédente n'interdit pas l'application de la méthode à des systèmes complexes, le QFD pouvant débiter par une analyse macroscopique. Le déploiement de la matrice initiale est ensuite possible vers des représentations plus détaillées. Inversement, un

modèle de simulation fin, utile pour améliorer le fonctionnement d'une partie de l'atelier, peut être simplifié pour une meilleure efficacité. Cette démarche de décomposition et d'agrégation permet de conserver la maîtrise de la méthode indépendamment de la complexité du système.

Le principal avantage de l'approche proposée est le gain de temps en phase de conception. La durée de la simulation n'est plus une contrainte dans la mesure où elle est réalisée en temps masqué. Les résultats sont ensuite exploités par l'ingénieur pour analyser l'influence des paramètres de conception sur les performances. Les moyens les plus efficaces sont obtenus instantanément après la modification d'un objectif ou l'inhibition d'un levier d'action. De plus, lorsqu'il sera jugé utile d'améliorer l'atelier existant ou d'en proposer un nouveau, il ne sera pas nécessaire de répéter systématiquement la simulation. La matrice obtenue est réutilisable pour trouver les leviers d'action les plus pertinents.

Par rapport à une analyse de sensibilité classique, les résultats sont présentés sous une forme qualitative facilement exploitable par le concepteur. Des données subjectives peuvent être ajoutées à la matrice, puis exploitées conjointement avec les résultats qualitatifs de la simulation. La présentation des informations conformément à une démarche d'ingénierie bien connue facilite l'utilisation manuelle ou informatique des résultats. L'utilisation d'un outil couramment utilisé, le tableur, est un atout supplémentaire. Un logiciel spécifique peut également être employé pour une présentation plus agréable des matrices et pour procurer un lien direct avec d'autres méthodes.

4.2 *Perspectives*

Les travaux menés dans le cadre présenté ont principalement été orientés vers la résolution du problème d'identification de paramètres numériques par des techniques statistiques. Cette partie constitue le cœur de la méthode mais n'est pas suffisante pour permettre une utilisation autonome de la méthode. Par conséquent, une seconde phase, actuellement en cours, s'intéresse à la facilité d'emploi du système pour permettre son exploitation directe en milieu industriel. Le traitement automatique de matrices mixtes, comprenant simultanément des objectifs chiffrés et des souhaits vagues, est le problème fondamental à résoudre. Lorsque le découplage entre problèmes qualitatif et quantitatif n'est pas possible, des outils de modélisation appropriés sont nécessaires pour assurer la cohérence du traitement. Une approche basée sur la logique floue semble tout à fait appropriée pour procurer le formalisme souhaité.

5. Références

- Akao, Y., (1990), *Quality Function Deployment*, Productivity Press, Portland Oregon.
- Babic, B., (1999), "Axiomatic design of flexible manufacturing systems", *International Journal of Production Research*, 37, 5, pp. 1159-1173.
- Buffet, B., F. Hervieu, (1999), "Bouclage Conception Evaluation - Apport des méthodes matricielles (QFD) pour l'utilisation des données de simulation en vue de la reconception des Systèmes de production", *Rapport interne, IFMA*

- Dean, A., D. T. Voss, (1998), *Design and Analysis of Experiments* (Springer Texts in Statistics), Springer-Verlag
- Derriche, O., D. Gien, (1998), "Non-quality cost evaluation by the simulation of manufacturing systems" *INCOM'98*, Vol. III, pp. 553-558, 24-26 June 98, Nancy-Metz, France
- Evbuomwan, N.J.O., S. Sivaloganathan, A. Jebb and A.S.J. Stickley, (1994), "Quality Function Deployment - Past, Present and Future", *CARS & FOF'94*, Ottawa, Canada, pp. 596-601.
- Hill, M. F., L. K. Collins, (1999), "Total quality management and business process re-engineering: A study of incremental and radical approaches to change management at BTNI", *Total Quality*, 10,1, pp. 37-45.
- Jacqmart, S., D. Gien, (1998), "An approach based on fuzzy sets to model design quality", *INCOM'98*, Vol. III pp. 97-102, 24-26 June 98, Nancy-Metz, France
- Kasser, J. (1995), *Applying Total Quality Management to Systems Engineering*. Boston: Artech House, 1995.
- Kelton, W., R. Sadowski, and D. Sadowski, (1998), *Simulation with Arena*, McGraw-Hill, New York.
- Kleijnen, J., and R. Rubinstein, (1996) "Optimization and sensitivity analysis of computer simulation models by score function method", *European Journal of Operational Research*, 88, pp. 413-427.
- Koonce, D. A., R. P. Judd., C. M. Parks, (1996), "Manufacturing systems engineering and design : an intelligent, multi-model, integration architecture", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 9, 6, pp. 443-453.
- Ladet, P. F., Vernadat (Editors), (1995) . *Integrated manufacturing Systems Engineering*, Chapman & Hall, London.
- Law, A.M., and Kelton, W.D., (1991), *Simulation Modeling and Analysis*, (Chapter 12) McGraw-Hill, New York.
- Macedo, J., (1999), "A generative system for re-engineering manufacturing system organization", *International Journal of Production Research*, 37, 12, pp. 2639-2664.
- Myers, R., and D. Montgomery, (1995), *Response Surface Methodology*, John Wiley and Sons, New York.
- Revelle, J., C.A. Cox, J.W. Moran and R.A. Kemerling, (1998), *The QFD Handbook*, John Wiley and Sons, New York.
- Taguchi, G., (1988), *Introduction to quality engineering - Designing quality into products and processes*, Asian Productivity Organization, Tokyo.
- Yong, J., A. Wilkinso, (1999), "The state of total quality management : a review" , *The International Journal of Human Resource Management*, 10, 1, pp. 137-161.

6. Annexe

6.1 Calcul et contrôle de la validité des corrélations

La matrice de covariance entre les paramètres de simulation et les performances traduit la variabilité des objectifs x , et des moyens y :

$$C(ij) = E \left\{ (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) \right\} \quad (1)$$

Avec \bar{y}_j et \bar{y}_i les moyennes respectives des objectifs et des moyens.

La matrice de corrélation R en est déduite immédiatement :

$$R(i, j) = \frac{C(i, j)}{\sqrt{C(i, i)C(j, j)}} \quad (2)$$

Le résultat est présenté en pourcentage P pour une meilleure lisibilité :

$$P(i, j) = 100 R(i, j) \quad (3)$$

Pour respecter l'esprit qualitatif de la matrice QFD nous calculons également des poids sur une échelle 0.. 9 :

$$W(i, j) = E(iOR(i, j)) \quad (4)$$

Il est nécessaire de vérifier si la corrélation calculée est significative. L'estimation r d'un coefficient de corrélation nul suit une loi définie par :

$$T = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \sim t_{a, n-2} \quad (5)$$

où n est le nombre d'expériences et $t_{a, n-2}$ la loi de Student à n-2 degrés de liberté pour un niveau de confiance a. Ce résultat permet de déterminer la valeur limite de r :

$$r = \frac{t_{a, n-2} \sqrt{\frac{n-2}{n-2+1}}}{\sqrt{1 + t_{a, n-2}^2 \frac{n-2}{n-2+1}}} \quad (6)$$

Dans le cas où le coefficient de corrélation est jugé significatif, une estimation de l'intervalle de confiance pour sa valeur est obtenue en utilisant la transformation de Fisher :

$$z = \text{th}(r) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+r}{1-r} \right) \quad (7)$$

$$\text{th}^{-1} \left(z - t_{1-\alpha/2, n-2} \frac{1}{\sqrt{n-3}} \right) < r < \text{th}^{-1} \left(z + t_{1-\alpha/2, n-2} \frac{1}{\sqrt{n-3}} \right) \quad (8)$$

A partir de ces résultats, seuls les poids significatifs sont conservés dans la matrice QFD.

6.2 Application

Revenons à l'exemple présenté et considérons le plan suivant dont nous ne présentons que les premières expériences (figure 10) :

SIMULATION DE L'ATELIER - DONNÉES D'ENTRÉE					
	Capacité EN-COURS après usinage	Capacité EN-COURS après contrôle	Capacité Usinage	Capacité Contrôle	Capacité Assemblage
Essai 1	1	1	1	1	1
Essai 2	1	2	1	2	2
Essai 3	1	3	2	1	1
Essai 4	1	4	2	3	3
Essai 5	1	5	3	2	3
Essai 6	1	6	3	3	2
Essai 7	2	1	1	3	3
Essai 8	2	2	2	1	3
Essai 9	2	3	3	2	1
Essai 10	2	4	1	2	2
Essai 11	2	5	2	3	1
Essai 12	2	6	3	1	2
Essai 13	3	1	2	1	2
Essai 14	3	2	2	2	3
Essai 15	3	3	3	3	2
Essai 16	3	4	3	1	1
Essai 17	3	5	1	3	1
Essai 18	3	6	1	2	3
Essai 19	4			2	1
Essai 20	4	2	1	3	1

Figure 10 : Plan d'expériences

Un ensemble de simulations est lancé à partir de ces données. Le résultat obtenu, susceptible de varier sensiblement en fonction de l'initialisation des générateurs de nombres pseudo-aléatoires, est alors (figure 11) :

SIMULATION DE L'ATELIER - FICHIER RESULTAT						
Modèle:	Simulation	Longueur des répétitions:	126720	Date de la simulation:	5 / 1 / 799	
Loi d'entrée:	EXPO(20)	Temps d'usinage:	Macn 1 EXPO(20) / Macn 2 EXPO(1) / Macn 3 EXPO(17)			
Essai 1						
Nbre de pièces finies:	6142	Nb moyen de pce en attente:	Filet 0.1	File 2 0.6	File 3 0.4	
Durée de fabrication:	86.01	Taux moyen d'occupation:	Mach. 1: 104.8%	Mach. 2: 119.0%	Mach. 3: 105.9%	
Encours moyens :	8.6					
Essai 2						
Nbre de pièces finies:	5056	Nb moyen de pce en attente:	Filet 645.0	File 2 1.0	File 3 0.2	
Durée de fabrication:	244.18	Taux moyen d'occupation:	Mach. 1: 300.0%	Mach. 2: 99.6%	Mach. 3: 86.9%	
Encours moyens :	658.0					
Essai 3						
Nbre de pièces finies:	5297	Nb moyen de pce en attente:	Filet 491.0	File 2 0.8	File 3 2.1	
Durée de fabrication:	256.99	Taux moyen d'occupation:	Mach. 1: 100.0%	Mach. 2: 156.3%	Mach. 3: 91.7%	
Encours moyens :	498.9					

Figure 11 : Résultats de la simulation

En appliquant le simple calcul de la matrice de corrélation (2), puis la présentation sous forme de pourcentage, nous obtenons la feuille de calcul suivante (figure 12) :

SIMULATION DE L'ATELIER - CORRELATIONS

	Durée de fabrication	Nb de pièces en cours	Nb de pces en attente	
			Contrôle	Assemblage
Capacité En-cours après usinage	5%	-1%	52%	-7%
Capacité En-cours après contrôle	7%	17%	2%	21%
Capacité Usinage	-59%	19%	22%	-34%
Capacité Contrôle	13%	77%	-<<%	3%
Capacité Assemblage	-33%	40%	-61%	-68%

	Nb de pièces en en-cours	Taux d'occupation		
		Usinage	Assemblage	Contrôle
Capacité En-cours usinage	0%	-27%	12%	-1%
Capacité En-cours contrôle	-18%	-3%	20%	15%
Capacité Usinage	51%	41%	4%	17%
Capacité Contrôle	-78%	59%	57%	77%
Capacité Assemblage	-38%	-61%	-67%	3%

Figure 12 : Corrélations (%)

Il ne reste plus qu'à éliminer les valeurs non significatives (6) pour ne conserver que les coefficients fiables pour l'analyse (figure 13). Nous précisons également les intervalles de confiance, utilisables par exemple pour intégrer l'imprécision de la détermination dans le déploiement des objectifs.

SIMULATION DEL'ATEUER - TEST DE VALIDITE DES RESULTATS

	Durée de fabrication			Nb de pièces finies			Nb de pces en attente					
							Ccrtrôle			Assemblage		
Capacité Encars après usinage							5.21	1.8	7.5			
Capacité Encars après contrôle												
Capacité Usinage	-5.89	-7.9	-27									
Capacité Centre				7.74	56	8.9	-4.84	-7.3	-1.3			
Capacité Assemblage				4.04	0.3	6.8	-6.08	-80	-3.0	-6.79	-8.4	4.1

	Nombre de pièces en encours			Taux d'occupation								
				Usinage			Ccrtrôle			Assemblage		
Opacité Encots après usinage												
Capacité Encars après contrôle												
Capacité Usinage				4.13	04	6.8						
Capacité Centre	-7.81	-8.9	-57				567	2.4	7.8	7.70	5.5	89
Capacité Assemblage	-3.77	-6.6	0.0	-606	-80	-3.0	-666	-83	-3.9	178	0.0	6.6

Figure 13 : corrélations significatives et intervalles de confiance

Cette présentation peu attractive est transformée (4) pour donner la forme usuelle d'une matrice QFD (figure 8).