

# META-MODELE D'INTEGRATION DE LA MAINTENANCE EN CONCEPTION

*Wolfgang Nzie*

Département de Génie Mécanique, ENSAI,  
Université de Ngaoundéré, Cameroun

*Bienvenu Kenmeugne*

Department of Mechanical Engineering,  
Higher Technical Teachers' Training

*Olivier Garro*

Directeur de l'Institut International de la  
Francophonie de l'Université de Lyon 3, France

---

## Abstract

The emergence of any product during design is gradual thanks to the different professionals who generally input their diverse views and opinions. This is considered in the Distributed Design Model, where these professionals are not only networkly connected, but have their own languages, tools and methods for data communication. The framework FBS (Function-Behavior-Structure), earlier considered allows the object of maintenance to be modelled in three ways: functional model of maintenance, structural model of maintenance and behavioural model of maintenance. Based on the Distributed Design Approach, the algebraic formulations of maintenance languages have been described to model maintenance integration. In this work, we first propose a meta-model of maintenance that captures all points of specific views of the maintenance professionals on the design object and gives a holistic view of maintenance during design process. Next, design methods and tools are identified to facilitate the utilization of the meta-model during design process, maintenance, dismantlement and recycle of product. Lastly the statement of an optimization maintenance problem is highlighted. The effort has been made for the given mathematical function to establish the results by using Lagrangean multiplier method. The validation of the meta-model should be an illustrative prespective in the real concurrent design process.

---

**Keywords:** Integration, FBS models, Meta-model, Design methods and tools, Maintenance design optimization.

---

## Résumé

Pendant la conception le produit émerge graduellement grâce à l'interaction des différents métiers qui ont des points de vue locaux en général divergents. Cette approche est reprise dans la méthodologie de conception distribuée, où les métiers sont non seulement connectés en réseaux, mais disposent chacun d'un langage, des outils et méthodes propres de communication des données. Le modèle de l'objet de conception FBS (Function-Behavior-Structure) a permis d'envisager plus tôt dans la conception trois modèles de l'objet de maintenance : le modèle fonctionnel de maintenance, le modèle comportemental de maintenance et le modèle structurel de maintenance. Dans l'optique de la conception distribuée, les formalismes algébriques des langages de maintenance ont été décrits pour modéliser son intégration. Dans ce travail, nous proposons d'abord un méta-modèle de maintenance qui capture simultanément tous les points de vues spécifiques de ce métier sur l'objet de conception, et lui donne une vision holistique d'intégration au cours de sa conception suivant ses trois aspects : fonctionnel, structurel et comportemental. Ensuite, les outils et méthodes de conception sont identifiés pour faciliter l'utilisation du méta-modèle pendant le processus de conception, la maintenance pendant le cycle de vie, le démantèlement et le recyclage du produit. Enfin, une approche d'optimisation de la conception de maintenance est mise en exergue et la méthode des multiplicateurs de Lagrange est proposée pour sa mise en œuvre. La validation du méta-modèles serait la perspective de ce travail dans un contexte de processus de conception concurrente.

---

**Mots clés :** Intégration, Modèles FBS, Méta-modèle, Outils et Méthodes de conception, optimisation de la conception de maintenance

## Introduction

Les activités de maintenance font partie du cycle de vie d'un produit. Pour les rendre efficaces en phase d'exploitation, leur prise en compte doit être pensée dès les premières phases du processus de conception (Bouit, 1998). Beaucoup d'études portant sur l'intégration de la maintenance en conception existent (Gandhi et al., 1999), (Srinivasan et al., 1998), (Anoop et al., 2003), etc. Il s'en dégage plutôt que la mise en œuvre de l'intégration de la maintenance s'identifie à la conception des critères des paramètres constitutifs de maintenance que sont la maintenabilité, la fiabilité et la sécurité (Monchy, 2000). Les informations sur l'accessibilité par exemple du composant d'un équipement sont formulées dans (Suh, 1990). Cependant dans l'espace exploratoire des solutions d'optimisation de ces critères, les contraintes spécifiques ne sont pas toujours exemptes de contradictions.

Il est reconnu des travaux de (Salaü, 1995) et (Garro, 1995) que la conception d'un produit résulte de l'interaction de plusieurs métiers, qui ont des points de vue et des langages propres. En particulier pour le métier de maintenance, des données manipulées ont été identifiées et des formalismes algébriques des langages de maintenance ont été développés (Nzié et al., 2007). Les modèles de processus de conception selon Hue et Dong (Brissaud et al., 1996) et FBS (Function-Behavior-Structure) selon (Gero, 2000) ont permis d'envisager, dans une approche MCD (Modèle de Conception Distribuée), les modèles structurel, fonctionnel et comportemental de maintenance qui prennent en compte les spécificités de ce métier en amont de la conception (Nzié, 2006).

Dans ce travail il sera proposé un méta-modèle de maintenance et seront indiqués les outils et méthodes aux concepteurs de maintenance qui donnent une vision systémique intégrée des aspects fonctionnels, structurels et comportementaux du produit, pour qu'il soit facile à maintenir, démanteler et recycler pendant son cycle de vie. Aussi, une approche de la problématique d'optimisation de la conception de maintenance est mise en exergue et la méthode des multiplicateurs de Lagrange est proposée pour la mise en œuvre de la solution.

Mais avant, il sera présenté dans ce travail les trois sous espaces qui constituent l'espace d'état de conception suivant la structure FBS, qui est considéré comme plateforme de notre démarche.

### **Plateforme Function-Behavior-Structure (FBS)**

La conception existe parce que le monde qui est autour de nous ne nous satisfait pas. L'objectif des concepteurs est donc de changer le monde par la création des artefacts pour satisfaire aux besoins exprimés par les hommes. Ils le font en transformant les spécifications des besoins ainsi exprimés sous forme de fonctions et en produisant des descriptions des artefacts ou outils intermédiaires capables de les générer. Par conséquent, il se produit la connaissance. L'obtention d'une plateforme de conception s'articule alors sur le triptyque Function-Behavior-Structure plus une base de connaissances (Gero, 1996). Ainsi, l'espace d'état de représentation de l'objet de conception a trois sous espaces d'abstractions : le sous espace des variables de sa structure **S**, le sous espace des variables de son comportement **B** et le sous espace des variables de sa fonction **F**. La fig. 1 illustre ces trois sous espaces de l'espace d'état de conception et leurs transformations mutuelles, décrites explicitement dans (Gero, 2000).

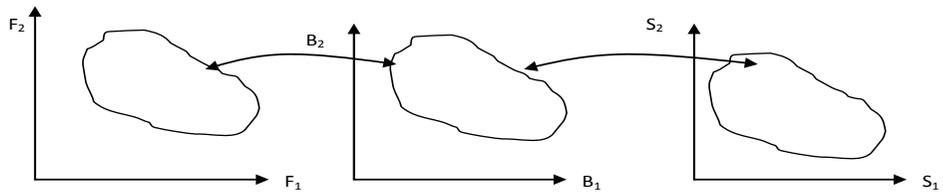


Fig. 1 Les trois sous espaces FBS de l'espace d'état de conception

Pour que le métier de maintenance soit pris en compte dans cet espace d'état de la conception, à partir des modèles de représentation du produit dans les trois sous espaces qui existent, qui vont être rappelés, dans la suite de ce travail un méta-modèle du produit, qui sans doute permettra à l'aboutissement d'un produit apte à la maintenance est exposé.

Le processus de conception ayant pour buts fondamentaux la transformation de la description fonctionnelle du produit, résultant des spécifications du cahier des charges, à une description physique ou structurelle qui peut être fabriquée, le méta-modèle s'appuiera sur plusieurs thèmes qui ont fait l'objet de recherches dans la conception d'un produit de technologie optimale, notamment ceux proposés par (Ken Wallace et al., 1995) et complétés dans la fig. 2.

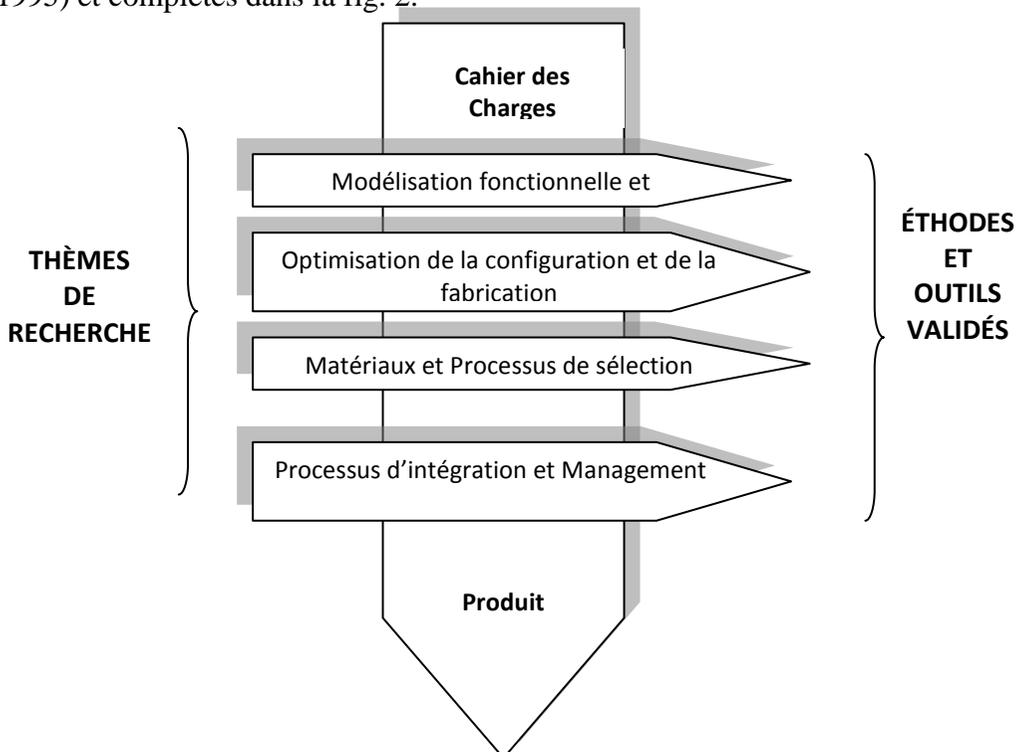


Fig.2 Quatre thèmes de recherche

### Modélisation fonctionnelle d'un produit de maintenance

La vocation de la maintenance est de rétablir les fonctions d'un produit en cas de baisse ou perte de performance définitive de celui-ci, au coût optimum. Il devient alors évident que cette tâche sera plus aisée si l'acteur concepteur de maintenance participe au choix des fonctions d'un produit en phase de conception. Et qu'il définisse à ce niveau des méthodes et outils qui seront utilisés pendant toutes activités de maintenance pendant l'exploitation du produit. Le modèle fonctionnel du produit de maintenance est composé de ce qui est appelé les maintenance FF (Functional Features) dans (Nzié et al., 2007) dont les éléments constitutifs sont présentés dans la fig. 3, et est ajoutée une liste non exhaustive d'outils et méthodes de stratégies de conception et d'exécution de maintenance.

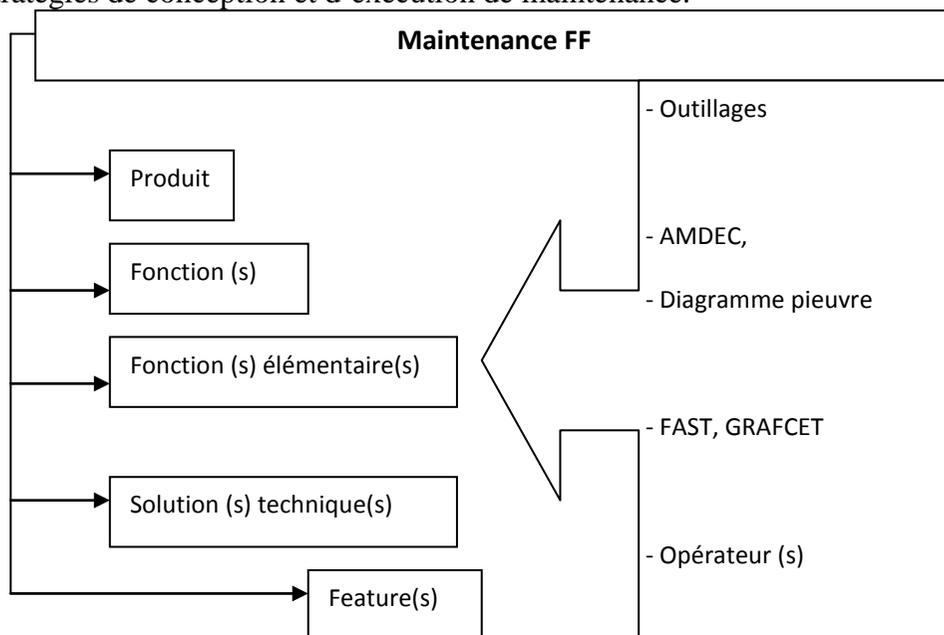
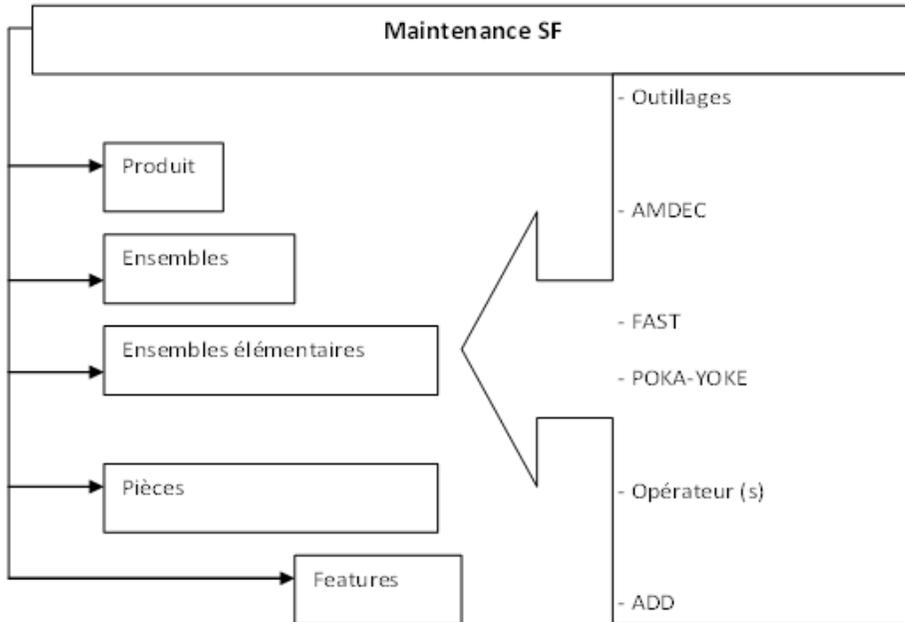


Fig. 3 Modèle fonctionnel de maintenance

### Modélisation structurelle ou organique du produit de maintenance

Les fonctions techniques rétablies pendant les activités de maintenance sont satisfaites par des organes ou pièces constitutives du produit. La participation du concepteur de maintenance devient donc inévitable dans les choix de configuration structurelle et calculs du dimensionnement, de la sélection et traitement des matériaux, du choix des formes de ces pièces et de leur réalisation ou fabrication en vue d'une optimisation du concept FMD (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité) (Amari et al., 2005), (Lad et al., 2008). Le modèle de la structure du produit

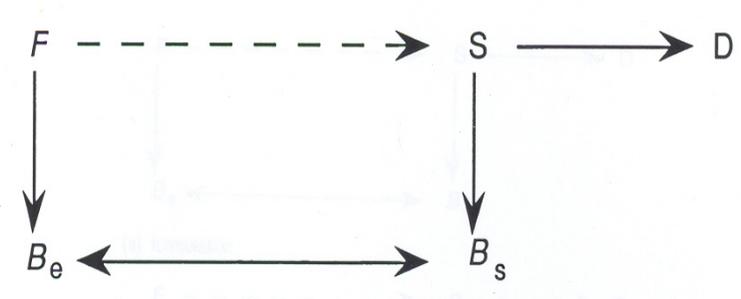
de maintenance tout au long de la conception est illustré par les maintenance SF (Structural Features) (fig.4).



**Fig. 4** Modèle structurel de maintenance

**Modélisation comportementale du produit de maintenance**

A partir des spécifications du cahier des charges, les concepteurs définissent les fonctions du produit. Ces fonctions sont réalisées par un ou un ensemble de composants constituant la structure du produit. Le comportement du produit résultant de la structure (Bs – Structural behavior) est en général différent du comportement attendu (Be – Expected behavior) par les concepteurs à cause des aléas dus à la fabrication comme l’illustre la fig. 5 du modèle de processus de conception selon (Gero, 2003).



**Fig. 5** Modèle de conception comme process

La vue comportementale d'un produit de maintenance se fait à travers quatre catégories de facteurs :

- Les caractéristiques inhérentes, par exemple la géométrie du produit ;
- Les contraintes et charges qui sollicitent le produit ;
- Les mouvements relatifs du produit ou ses composants ;
- L'environnement d'exploitation.

L'interaction de ces facteurs est cause des phénomènes de fatigue, d'usure, des fissures, des déformations, etc. qui sont tous des mécanismes de détérioration, et au de-là d'un certain seuil, entraînent des défaillances. Pour réduire l'écart  $Be - Bs$  lors de la conception du produit, ou le rétablir dans les limites des spécifications s'il devient trop grand à cause des facteurs ci-avant cités pendant l'exploitation, le concepteur de maintenance doit caractériser des points de vues physique, chimique et mécanique des matériaux, les différents traitements des composants du produit en fonction du futur environnement d'exploitation et des utilisateurs. Les maintenance BF (Behavioural Features) décrivent dans ce travail la vue comportemental du produit de maintenance comme le montre la figure fig.6

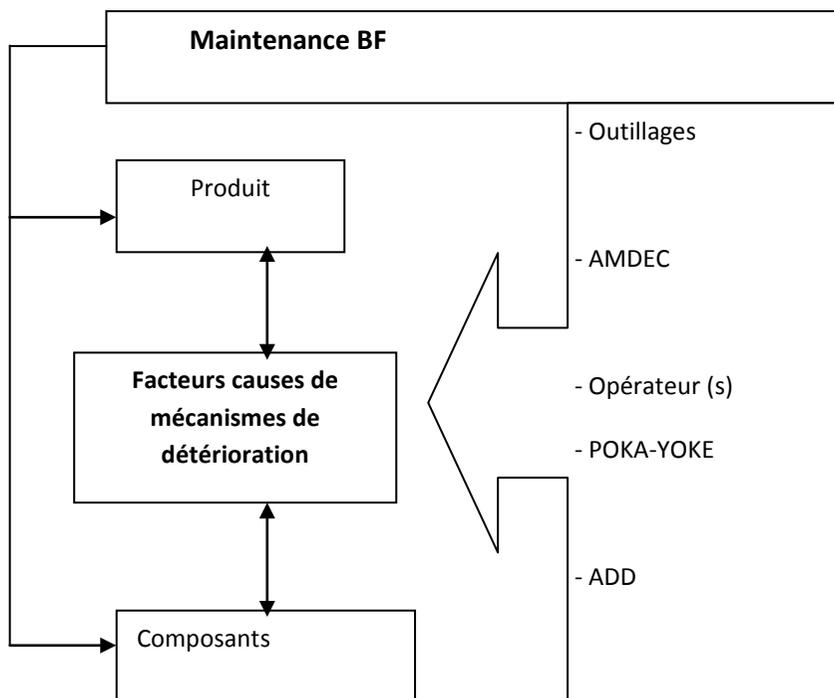
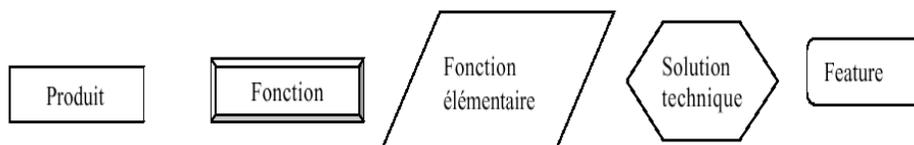


Fig. 5 Modèle comportemental de maintenance

### Modélisation du méta - modèle de maintenance

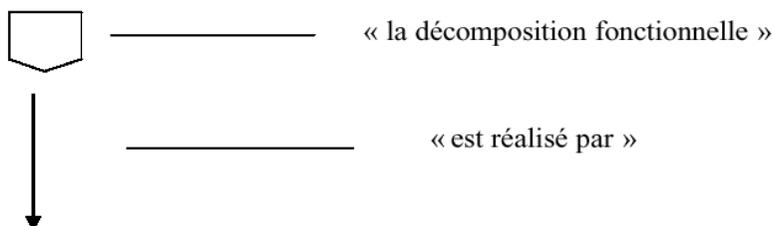
Nous allons l’envisager sous forme de schéma physique intégrant les trois classes de variables de maintenance qui décrivent la fonction, le comportement et la structure du produit. Il va s’appuyer sur une approche basée sur l’interdépendance résultant de l’addition (combinaison, analogie et mutation), ou de la substitution (mutation, analogie et émergence) des variables du produit pendant le processus de conception validées par les travaux de (Gero et al., 1992).

Le lien entre les modèles fonctionnel et structurel de maintenance se fait par le haut (produit) et le bas (features). Un méta-modèle de maintenance du produit est ainsi envisageable, car il existe un lien entre le produit et les facteurs causals de mécanismes de détérioration. Il va intégrer à la fois les aspects fonctionnels, structurels et ontologiques (de vie ou de comportement). Et pour chaque élément du méta-modèle, les dispositions méthodologiques ou outils d’aide à la conception de la maintenance sont prévues pour supprimer définitivement (maintenance curative), provisoirement (dépannage), ou prévenir (maintenance préventive) des défaillances éventuelles ou potentielles du produit pendant la conception et plutarad son exploitation future. Ainsi sera utilisé le formalisme des méthodes d’analyse et de conception orientées objet (A. Saucier, 95). Par souci de lisibilité et visibilité meilleures du méta-modèle, nous associons un symbolisme formel différent (Fig. 6) à chaque type d’élément des hiérarchisations précédentes.

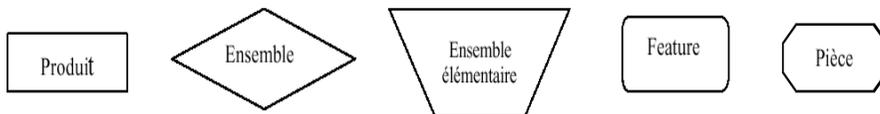


**Fig. 6** Symbolisme de représentation des variables fonctionnelles (F) du produit

Entre les variables, nous associons les liens suivants (Fig.7).



**Fig. 7** Liens des variables F



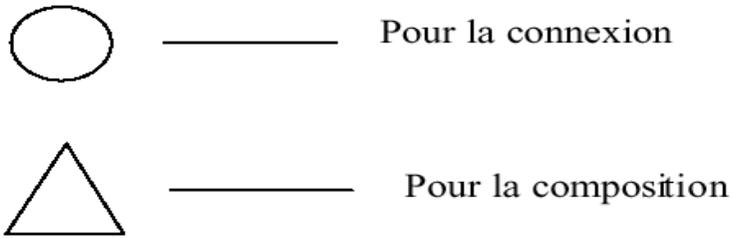
**Fig. 8** Symbolisme de représentation des variables S

Deux types de relations sont identifiés pour représenter les liaisons (l'interaction) des variables du modèle structural de maintenance (Takata et al, 1995) :

**La connexion** est une relation d'assemblage entre deux éléments qui n'ont pas de relations d'inclusion entre eux (exemple une pièce à une pièce, une feature d'assemblage à une feature d'assemblage).

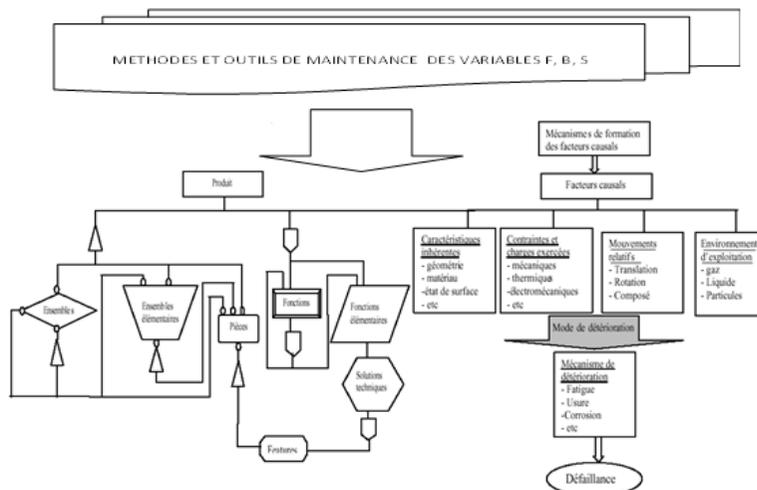
**La composition** est une relation d'assemblage entre deux éléments qui ont des relations d'inclusion (ensemble et ensemble élémentaire).

Les symboles qui représentent ces relations sont les suivants (fig. 9) :



**Fig. 9** Symbolisme de connexion et de composition d'assemblages

A partir du symbolisme des variables F, B, S de conception et de leur interdépendance, la figure 10 est illustrative du méta-modèle de maintenance du produit.



**Fig. 10** Méta-modèle produit de maintenance

### Modèle d'optimisation de la conception de maintenance

A partir des concepts fondamentaux de la conception collaborative et distribuée rappelés dans (Kroo, 2004), l'optimisation de la conception de maintenance envisagée par le méta-modèle de la fig. 10 peut alors se mettre en œuvre suivant la formulation générale (Nzié et al., 2014) :

Minimiser  $f(X)$ , fonction objective

$$\text{si } G_j(X) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

$$\text{Où } X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_m \end{pmatrix} \text{ est le vecteur de variables de conception F, B et S de}$$

maintenance.

Les contraintes d'inégalités (1) peuvent être transformées en contraintes d'égalités par addition des variables positives manquantes (écarts)  $y_j^2$  pour que la fonction contrainte devienne:

$$G_j(X, Y) = g_j(X) + y_j^2 = 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$\text{Où } Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_m \end{pmatrix} \text{ est le vecteur des variables manquantes.}$$

Ce problème peut se résoudre par la méthode des multiplicateurs de Lagrange. Et pour cela on construit la fonction de Lagrange :

$$L(X, Y, \lambda) = f(X) + \sum_{j=1}^m \lambda_j G_j(X, Y) \quad (3)$$

$$\text{Où } \lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda_m \end{pmatrix} \text{ est le vecteur des multiplicateurs de Lagrange.}$$

Les points de stabilité de la fonction de Lagrange peuvent être trouvés en résolvant ce système d'équations (conditions nécessaires) :

$$\frac{\partial L}{\partial x_i}(X, Y, \lambda) = \frac{\partial f}{\partial x_i}(X) + \sum_{j=1}^m \lambda_j \frac{\partial g_j}{\partial x_i}(X) = 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_j}(X, Y, \lambda) = G_j(X, Y) = g_j(X, Y) + y_j^2 = 0, j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial y_j}(X, Y, \lambda) = 2\lambda_j y_j = 0, j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

La solution du système d'équations (4) – (6) donne la solution optimale du vecteur  $X^*$ , le vecteur du multiplicateur de Lagrange  $\lambda^*$  et du vecteur des variables manquantes  $Y^*$ . L'application de cette méthode donne des résultats satisfaisants dans le calcul du nombre de composants, des fiabilités des composants et des différents étages des composants et de la fiabilité globale d'un système mécanique complexe sous des contraintes de coût, de volume et de poids (Lakshminarayana et al., 2013). Toujours de ces derniers auteurs la résolution du système par la méthode de programmation dynamique donne des résultats avec une faible variation des contraintes. Cependant, une approche nouvelle d'AMDEC déployée corrige les causes de ces écarts

## Conclusion

L'interdisciplinarité du processus de conception exige des intervenants un ou plusieurs langages de communication compris par les uns les autres. Le degré d'intégration d'un métier serait pertinent selon qu'il met à disposition en conception des outils, méthodes et des modèles produits qui facilitent la prise en compte par tous les acteurs de ses spécificités. Le méta-modèle produit proposé donne une vision holistique du produit sous ses trois aspects fonctionnel, structurel et comportemental. Il liste les méthodes et outils à mettre en oeuvre qui permettent non seulement de considérer en amont de la conception chacun des aspects modèles du produit selon la perception de la maintenance, mais aussi que pendant l'exploitation l'équipement puisse être facile à maintenir, démanteler et recycler.

L'applicabilité du meta-modèle proposé dans un contexte réel de conception concurrente d'un équipement est la perspective de ce travail pour une validation définitive.

## References:

Anoop Desai, Anil Mital (2003), *Evaluation of disassemblability to enable design for disassembly in mass production*, International Journal of Industrial Ergonomics 32, 265–281.

- Bhupesh Kumar Lad, M.S. Kulkarni (2008), *Integrated reliability and optimal maintenance*
- Bouit B., Lyonnet P. (1998), *Contraintes de maintenance dans Conception de produits mécaniques, méthodes, modèles, méthodes et outils*, Paris : Hermes.
- Brissaud D., Garro O. (1996), *An approach to concurrent engineering using distributed design methodology* , CERA journal, V4, N°3, pp 303-311, September.
- Gandhi O.P., Wani M.F. (1999), *Development of maintainability index for mechanical systems*, Reliability Engineering and System Safety 65 (1999) 259-270, Elsevier.
- Garro O., Salaü I., Martin P. (1995), *Distributed design Theory and methodology*, CERA journal, V3, N°1, pp. 43-54.
- Gero et al. (2000), *Computational Models of Innovative and Creative Design Process*, Technological Forecasting and Social Change 64, 183-196, ElsevierScience Inc. All rights reserved.
- Gero J.S. (1998) S. Gero, *Concept formation in design*, Knowledge-Based Systems, 1998, Vol.11, 429-435.
- Gero J. S., Kannengiesser U.(2003),*The situated function–behaviour–structure Framework*, Published by Elsevier Ltd.
- Ken Wallace, Stuart Burgess (1995), *Methods and tools for decision making in engineering design*, Design Studies 16, 429-446.
- Kroo I. (2004), *Distributed multidisciplinary design and Collaborative optimization*, VKI lecture series on Optimization Methods & Tools for Multicriteria/Multidisciplinary Design, November 15-19.
- Monchy F. (2000), *maintenance, Méthodes et Organisation*, dunod, Paris, 2000.
- Nzié W. ( 2006), *Intégration de la maintenance en conception: Application à un équipement Agro-Industrielle*, Thèse de Doctorat soutenue à l'UTBM, France.
- Nzié W., Kenmeugne B., Garro O. (2007), *Algebraic Formulations of Maintenance for its Integration in Design*, European Journal of Scientific Research, ISSN 1450-216X Vol.17 No.3, pp.338-350.
- Nzié W., Evenga Mang E. D., Samon J. B. (2014), *Integrating reliability in conceptual process design: an optimization approach*, International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET), Volume 5, Issue 7, July, pp. 83-93.
- Salaü I. (1995), *La Conception Distribuée: Théorie et Méthodologie*, Thèse de doctorat de l'Université de Nancy 1, France.
- Saucier A. (1995), *Un modèle multi-vues du produit pour le développement et l'utilisation de systèmes d'aide à la conception en ingénierie mécanique*,

Thèse de doctorat soutenue à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan (France) le 27 juin 1997.

Srinivasan H., R. Figueroa, R. Gath (1999), *Selective disassembly for virtual prototyping as applied to de-manufacturing*, robotics and computed Integrated Manufacturing 15, 231-245.

Suh N. P. (1990), *The principles of design*, New York : Oxford University Press, 1990.

Takata S., Hiraoka H., Asama H., Yamaoka N., Saito D. (1995), *Facility Model for Life-Cycle Maintenance System*, Annals of the CIRP vol.44/1/1995, pp.117-121.

Amari, S.V., Pham, H., Gidda, K. and Priya, S.K. (2005), *A novel approach for spares optimization of complex repairable systems*, Paper presented at the Annual Reliability and Maintainability Symposium, Alexandria, Virginia USA, 24–27 January.

Lakshminarayana K. S., Vijaya Kumar Y. (2013), *Reliability optimization of integrated reliability model using dynamic programming and failure modes effects and criticality analysis*, J. Acad. Indus. Res. Vol. 1(10) March.