

CIGI 2011

Approche DFA et conception fonctionnelle de produits modulaires : le modèle FARD

AURÉLIE ROBERT^{1,2}, KARINE DESCHINKEL³, SÉBASTIEN ROTH¹, XIU TIAN YAN⁴, SAMUEL GOMES¹

¹ Laboratoire M3M, UTBM
90010 BELFORT Cedex, France
prenom.nom@utbm.fr

² Entreprise MABI
ZAC des Saules 90400 BOTANS, France

³ Laboratoire LIFC, I.U.T. Belfort-Montbéliard
Rue Engel Gros 90000 BELFORT, France
karine.deschinkel@iut-bm.univ-fcomte.fr

⁴ Laboratoire DDMEM, University of Strathclyde
75 Montrose Street, Glasgow G1 1XJ, Scotland
x.yan@strath.ac.uk

Résumé

Cet article présente notre démarche de conception fonctionnelle de produits modulaires intégrant, dès les phases amont du processus de conception, les contraintes liées au métier de l'assemblage, à travers un modèle méthodologique baptisé FARD (Functional And Robust Design method). Le modèle FARD s'inscrit dans une démarche plus globale de conception routinière et hautement productive de systèmes mécaniques, qui s'appuie sur les connaissances et savoir-faire métier produit-process, et en particulier sur les contraintes liées au métier de l'assemblage, à travers la génération semi-automatique de séquences d'assemblage admissibles dès les phases amont de la conception. Cette démarche s'inscrit dans un contexte économique fortement concurrentiel, où la personnalisation de masse, la conception par plates-formes autour d'architecture produit-process prédéfinies et la conception fonctionnelle et modulaire à base de connaissances métier, représentent des axes stratégiques pour les entreprises qui veulent rester compétitives. Pour ce faire, nous proposons un nouvel algorithme de génération des séquences d'assemblage prenant en compte la structure modulaire d'un produit, calquée sur la décomposition fonctionnelle du besoin client. Suite à un état de l'art et à une description des différentes étapes de notre démarche, un cas d'application est présenté : le module vanne d'un marteau burineur pneumatique.

Abstract

This paper presents our approach of functional design applied to modular products considering, during the early phases of the design process, Design for Assembly (DFA) constraints, through a new methodological model defined as "Functional And Robust Design method" (FARD). This model is a part of a more global high productive design approach of mechanical systems, based on product and process knowledge acquisition and re-use, and particularly in our case, based on DFA constraints. Our objective is focused on product architecture definition, and also, semi-automatic generation of optimal assembly sequences. This approach is developed in a highly competitive economic context, where mass customization, design by platform, functional and modular design, knowledge-based engineering, represent strategic areas for companies that want to stay competitive in our global market. Our proposal consists in a new algorithm that generates optimal assembly sequences, considering the modular structure of a product, based on functional decomposition. After a brief literature review on these various topics, a description of the different steps our approach is presented. Then an industrial use-case is described in order to illustrate our concepts.

Mots clés – Conception fonctionnelle, Conception modulaire, Conception pour l'Assemblage, conception routinière, Ingénierie hautement productive

Keywords – Functional design, Modular design, Design for Assembly, routine design, High productive engineering

1 INTRODUCTION

Positionnées dans un contexte concurrentiel ultra compétitif, les entreprises font aujourd'hui face à des clients de plus en plus exigeants, qui souhaitent des nouveaux produits qui répondent parfaitement à leur besoin, et ceci à des prix toujours plus bas. De nouvelles démarches de conception, prônant : la personnalisation de masse, la conception par plates-formes autour d'architecture produit-process prédéfinies, la conception modulaire et la conception

hautement-productive à base de connaissances métier, émergent aujourd'hui pour répondre à ces évolutions. En créant des architectures de produits modulaires, à partir de pièces évolutives ou interchangeables, et dont le comportement et les impacts sur le processus de fabrication et d'assemblage sont parfaitement maîtrisés, les entreprises peuvent offrir des milliers de possibilités à leurs clients. La démarche de conception fonctionnelle de produits modulaires intégrant, dès les phases amont du processus de conception, les contraintes

liées au métier de l'assemblage, à travers le modèle FARD (« Functional And Robust Design » method) que nous proposons, s'inscrit dans une démarche plus globale de conception routinière et hautement productive de systèmes mécaniques [Gomes, 2008]. Notre contribution dans le cadre de cet article, concerne de manière plus spécifique la proposition d'un nouvel algorithme de génération des séquences d'assemblage prenant en compte la structure modulaire d'un produit, calquée sur la décomposition fonctionnelle du besoin client. Suite à un état de l'art et à une description des différentes étapes de notre démarche, un cas d'application est présenté : le module vanne d'un marteau burineur pneumatique.

2 ETAT DE L'ART

2.1 Conception pour l'assemblage (Design For Assembly)

La conception pour l'assemblage, ou Design For Assembly (DFA), est un domaine particulier du Design For X (DFX : Design For Manufacturing - DFM, Design For Environment - DFE, etc.) dédié à l'intégration des métiers en conception, dont l'objectif est de réduire les coûts de production en préparant au mieux l'assemblage des différentes pièces et sous-ensembles d'un produit.

[Stone et al., 2004] définissent plusieurs approches de conception pour l'assemblage dont la plus connue est la méthode de DFA développée par [Boothroyd et Dewhurst, 1983], [Boothroyd et al., 1994]. Cette méthode emploie des procédures d'évaluation quantitative pour optimiser l'assemblage des pièces les unes avec les autres et est basée sur des retours d'expériences. Cependant, les approches traditionnelles de DFA s'appliquent principalement lors des phases de conception détaillée du processus de conception, car elles nécessitent des niveaux de définition assez détaillée du produit étudié. De ce fait, il devient alors plus difficile d'engager des modifications sur le produit, en cas de problème détecté au niveau de son processus d'assemblage. Dès lors, et pour pallier à ces difficultés, [Demoly et al., 2011] a proposé une approche de conception pour l'assemblage, positionnée en phase d'étude préliminaire, donc très en amont du cycle de vie du produit. Cette méthode a pour principal objectif de faciliter toute éventuelle modification du produit pour permettre un meilleur assemblage des pièces qui le constituent.

Il propose également l'algorithme ASDA dont l'objectif est de définir des séquences d'assemblage dès les phases préliminaires de conception par l'application de connaissances liées aux processus d'assemblage à un produit encore à l'état de concept. Pour cela, cet auteur définit un graphe orienté représentant les liaisons entre les pièces du concept étudié (Figure 1). Ce graphe représente le sens d'assemblage des pièces les unes par rapport aux autres. Ensuite, ce graphe est transformé en une matrice d'adjacence (Figure 1), à partir de laquelle l'algorithme définit les séquences d'assemblage admissibles grâce à la reconnaissance de patterns d'assemblages types (série ou parallèle), correspondant à des sous-ensembles du produit. Au final, l'algorithme génère toutes les séquences d'assemblage admissibles sur la base des contraintes identifiées.

Notre contribution s'inscrit dans la continuité des travaux de Demoly, dans la mesure où nous nous intéressons également à la problématique de la conception pour l'assemblage, dès les phases de conception préliminaire. De plus, nous nous appuyons sur une partie de ses résultats, et en particulier le graphe orienté des liaisons, pour appliquer notre propre algorithme de génération de séquences d'assemblage. Par

contre, nous n'utilisons pas la matrice d'adjacence proposée mais une simple matrice remplie par des "1" et des "0". Les "1" représentent la présence d'un contact entre deux composants et les "0" l'absence de contacts entre composants. Tandis que dans la matrice d'adjacence, les contacts sont orientés (en utilisant "-1" ou "1"), représentant ainsi le sens d'assemblage entre deux composants. De plus, la matrice d'adjacence proposée par [Demoly et al., 2010] prend en compte les liens sans contact physique entre composants, en ayant recours à la notation " λ " et " $-\lambda$ ", information non considérée dans notre matrice.

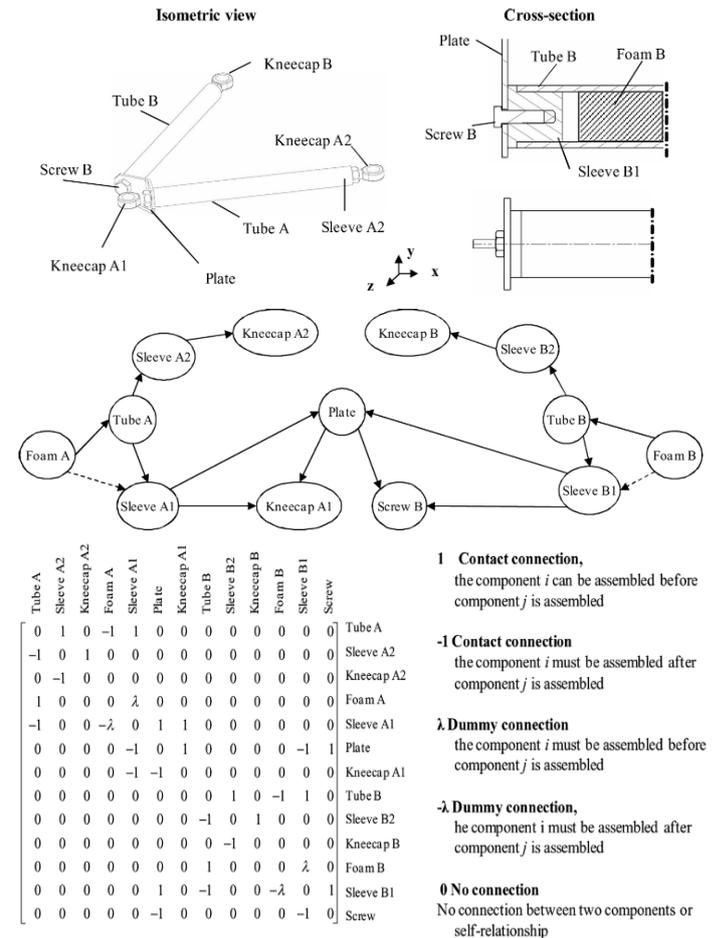


Figure 1 : Exemple de matrice d'adjacence proposée par [Demoly et al., 2010] et générée sur la base d'un concept triangle de suspension automobile

En ce qui nous concerne, la matrice que nous utilisons est une simple matrice de contact. Elle sert de base au graphe de liaisons orienté élaboré par le concepteur mais ne prend en compte ni l'orientation des contacts entre composants, ni les relations de précédence entre ces derniers.

Notre nouvel algorithme se base sur l'architecture modulaire définie pour le concept, en s'appuyant sur les fonctions du produit. L'objectif est de définir des séquences d'assemblage ordonnées et admissibles qui donnent l'ordre d'assemblage des modules les uns par rapport aux autres, puis des composants au sein d'un même module afin d'avoir des modules indépendants les uns des autres et vérifiant l'ensemble des contraintes. L'objectif de notre méthode, que nous avons baptisée FARD Method (« Functional And Robust Design » Method), est de définir des modules réalisables séparément pour les assembler au dernier moment de la production afin de disposer d'un grand nombre de produits à partir d'un nombre de modules fini.

2.2 Diagonalisation par blocs

Pour appliquer notre méthode FARD, nous exploitons donc une matrice de contact PP (Parts-Parts) pour modéliser les interactions entre les composants d'un produit. Cette matrice peut être vue comme une matrice de type "DSM-composants" (Design Structure Matrix) proposée par [Kusiak, 1999] et également développée au Massachusetts Institute of Technology par [Eppinger et al., 1994]. Le modèle DSM, de manière générale, fait l'objet d'un grand nombre d'études et d'applications ces dernières années [Institute of Product Development]. Ici, nous utilisons une méthode de partitionnement/clustering proposée par [Kusiak et al., 1994] pour former des ensembles d'éléments en interaction minimale afin de regrouper des composants entre eux.

2.3 Algorithme de définition des séquences d'assemblage

Notre travail de recherche s'appuie plus spécifiquement sur la théorie des graphes, largement décrite dans la littérature [Fournier, 2006]. Nous utilisons la même modélisation que celle employée dans l'algorithme ASDA (Assembly Sequences Definition Algorithm) proposé par [Demoly et al., 2011] en représentant les composants élémentaires par des nœuds et les relations de contact ou de précédence entre 2 composants par des arcs. Par contre, à la différence des travaux de Demoly, nous opérons sur le graphe ainsi obtenu, une coloration et une contraction des nœuds, et ceci, en fonction des informations issues de la matrice PP diagonalisée. La coloration et la contraction de graphes sont des opérations classiques en théorie des graphes [Gondran et Minoux, 1995]. L'approche CSP (Constraint Satisfaction Problems) [Vareilles, 2005] permet ensuite de formuler simplement l'ordre d'assemblage entre nœuds pour une génération rapide de séquences d'assemblage ordonnées. Des contraintes supplémentaires apportées par le gammiste pourront être ajoutées dans la modélisation CSP pour limiter éventuellement le nombre de séquences possibles.

3 MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE

3.1 Application du modèle FARD à une gamme de produits modulaires prenant en compte la conception pour l'assemblage

Dans le cadre de cet article, nous proposons une nouvelle contribution au premier modèle FARD ("Functional And Robust Design") appliqué aux produits modulaires, sous la forme d'une évolution du modèle que nous avons déjà élaboré [Robert et al., 2011]. En effet, l'objectif de la conception intégrée produit-process, s'appuyant sur le modèle FARD, est de définir la meilleure séquence d'assemblage pour un produit modulaire, tout en vérifiant la correspondance avec les fonctions du produit et la bonne tenue mécanique de cette gamme.

Ce modèle FARD traite de trois thèmes principaux qui sont : la conception fonctionnelle, la conception modulaire à base de DFA et le dimensionnement du produit, en s'appuyant sur des techniques de modélisation et de simulation. En ce qui concerne notre contribution, elle va se situer de manière plus spécifique, au niveau de l'interface entre les deux premiers thèmes évoqués précédemment. En effet, nous allons repartir de la définition du concept et des fonctions techniques pour aboutir aux séquences d'assemblage ordonnées et admissibles, respectant la structure modulaire du produit. Le prochain paragraphe détaille de manière plus spécifique, cette nouvelle contribution.

3.2 Notre contribution méthodologique

Comme évoqué précédemment, notre contribution au modèle FARD (« Functional And Robust Design ») se situe principalement à l'intersection du thème 1 et du thème 2. La (Figure 2) ci-dessous traduit un modèle au format BPMN (Business Process Modelling Notation [Bissay, 2009]) traduisant un extrait de la méthode FARD.

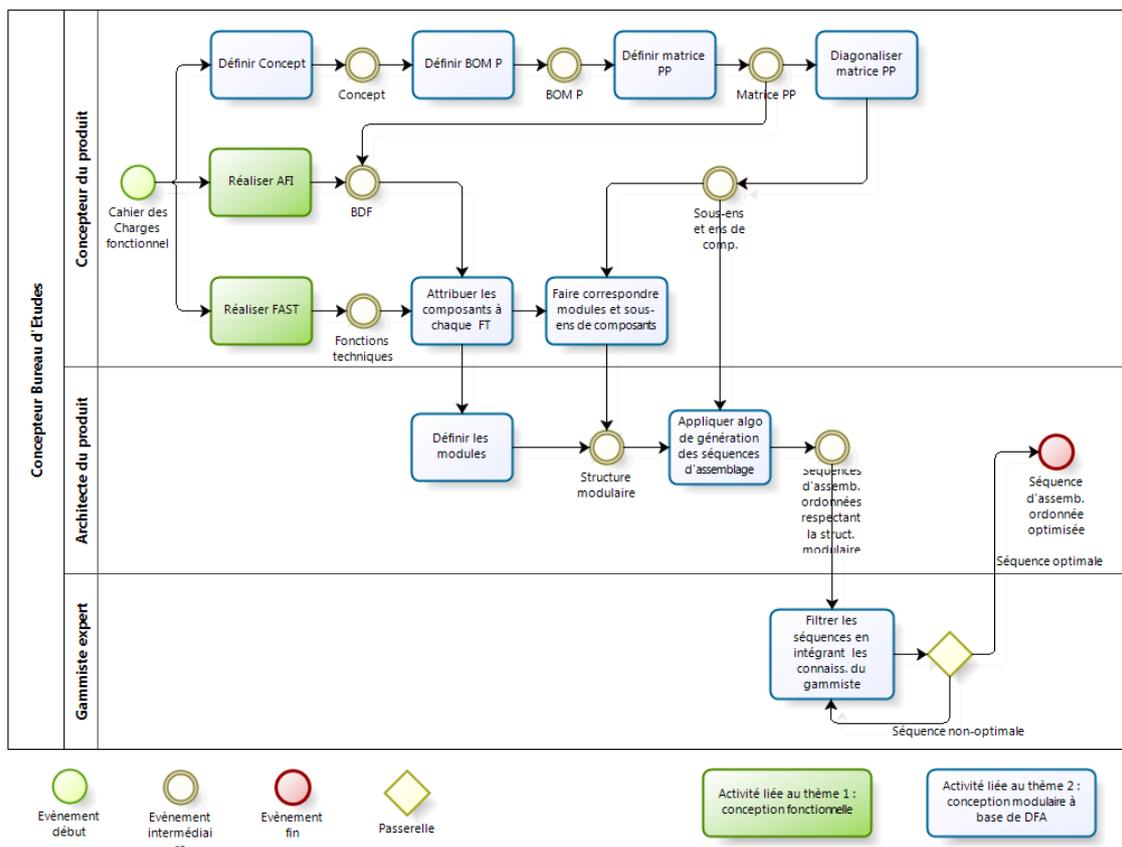


Figure 2 : Notre contribution au modèle FARD (« Functional And Robust Design »)

Au niveau de la conception fonctionnelle, il est possible de croiser les fonctions techniques avec la définition des composants permettant de remplir les fonctions du produit. L'analyse fonctionnelle interne met en évidence les composants participant à la réalisation des fonctions de service et contraintes à partir d'un concept de produit encore en phase de conception préliminaire, c'est-à-dire, en amont du cycle de développement du produit. Par conséquent, il est possible de définir la répartition de ces composants parmi les fonctions techniques issues des fonctions de service et des contraintes. Ainsi nous connaissons, par ce biais, les principaux composants remplissant les fonctions techniques du diagramme FAST (Function Analysis System Technique) [Bytheway C., 2007]. Nous mettons alors en place, au niveau du graphe de liaison, un système de coloration des composants en fonction de leur appartenance à une fonction technique (assignation d'une même couleur à tous les principaux composants d'une même fonction technique).

En parallèle, toujours à partir du concept, il est possible de déduire la liste de pièces, que nous qualifions de E-BOM (Engineering Bill Of Material). Cette liste de pièces, encore qualifiée de vecteur P (Part Vector), nous permet de réaliser la matrice PP (Part-Part matrix). Pour remplir cette matrice, il faut regarder les contacts entre pièces. La matrice PP va avoir deux intérêts. Sa première utilisation est la génération du graphe du BDF (Bloc Diagramme Fonctionnel) issue de l'Analyse Fonctionnelle Interne. Ensuite, cette matrice va également être diagonalisée par blocs afin de définir les ensembles et sous-ensembles de pièces d'un produit. A partir de cette matrice diagonalisée par blocs, il est possible de diffuser les couleurs attribuées à certains composants à d'autres du même bloc. Pour cela, nous allons regarder s'il y a bien la présence d'une seule couleur dans le bloc pour diffuser cette couleur aux autres composants non colorés à cet instant. Par contre, les composants liés à plusieurs blocs, composants d'interface, ne sont pas colorés.

Nous obtenons ainsi la structure modulaire de notre produit avec les modules correspondants à des fonctions techniques et certains composants déjà répartis parmi ces différents modules. Cependant, à ce stade de la méthodologie, tous les blocs ne sont pas obligatoirement colorés. Il en est de même pour les composants du concept.

Avant d'appliquer notre algorithme, le gammiste intervient une première fois pour apporter quelques simplifications. Certains groupes de deux pièces sont remplacés par un seul composant dans le graphe des liaisons. Par exemple, un axe comportant un joint torique sur sa périphérie va être considéré comme un seul composant. En effet, il n'existe pas vraiment de sens d'assemblage entre ces pièces, voire entre seulement deux pièces d'un même sous-ensemble. Cependant, elles doivent impérativement être assemblées avant d'être positionnées dans un ensemble. Ainsi le graphe des liaisons est simplifié grâce aux connaissances métier du gammiste.

La dernière étape de notre démarche consiste à appliquer notre algorithme s'appuyant sur la combinaison de la structure modulaire et la définition des ensembles et sous-ensembles du produit. Ce nouvel algorithme est détaillé dans la section suivante. Il génère toutes les séquences d'assemblage ordonnées admissibles en accord avec les contraintes d'architecture du produit. Finalement, parmi toutes ces séquences, le gammiste choisit celle qui répond, au mieux à ses connaissances métiers, liées à l'étape d'assemblage de produits.

3.3 Description de notre algorithme de génération des séquences d'assemblage prenant en compte la structure modulaire d'un produit

Notre méthode de génération de séquences d'assemblage se déroule en 3 étapes. Ces étapes sont détaillées dans les parties ci-dessous.

3.3.1 Etape 1 : Construction, coloration et simplification du graphe des liaisons

Nous construisons le graphe des liaisons en reprenant les informations fournies par la matrice PP (Parts-Parts). Les sommets du graphe correspondent aux différents sous-ensembles de composants de la matrice, les liens entre 2 sommets, aux coefficients non nuls de la matrice. La coloration des sommets de notre graphe est déduite également de la matrice PP diagonalisée. Le graphe ainsi obtenu est non orienté, mais par contre, du fait de sa simplicité de mise en œuvre, permet de réduire les risques d'erreurs humaines qui peuvent apparaître lors de la réalisation du graphe servant de base au graphe de liaisons proposé par [Demoly et al., 2011]. En effet, il nous semble plus sûr de remplir une matrice de contact PP, ligne par ligne, composant par composant, qu'un graphe de contacts en prenant en compte dès le début l'ordre d'assemblage des pièces. Ceci a d'ailleurs été confirmé par de multiples tests de réalisation de graphe de liaisons, laissant apparaître des erreurs.

Concernant la mise en œuvre de notre graphe "FARD Graph", il nous faut d'abord décrire l'ordre d'assemblage entre 2 sous-ensembles de composants. Pour ce faire, on transforme l'arête (i,j) par un arc orienté de i vers j s'il existe une contrainte de précedence pour l'assemblage entre deux sous-ensembles i et j. S'il existe un contact physique entre ces 2 sous-ensembles, l'arc est dessiné en trait plein, sinon en pointillé. Ensuite, le gammiste apporte quelques simplifications concernant des ensembles de deux pièces remarquables, comme détaillé dans la partie 3.2 de cet article.

En résumé, notre graphe "FARD Graph" est un graphe de contacts orienté, coloré et comportant des simplifications apportées par le gammiste.

Une fois le graphe "FARD Graph" construit, on vérifie qu'il ne contient pas de circuit par un parcours en profondeur [Cormen et al., 2009], pour s'assurer qu'il n'y ait pas d'erreur humaine dans la représentation de l'ordre d'assemblage. Il reste à simplifier le graphe en supprimant tous les arcs (i,j) pour lesquels il existe un autre chemin (de longueur ≥ 2) entre i et j de manière à supprimer certaines contraintes de précedence redondantes.

3.3.2 Etape 2 : Contraction du graphe par identification de motifs colorés

On désigne par motif coloré un ensemble constitué de composants d'une même couleur et éventuellement de composants sans couleur. On recherche des motifs colorés vérifiant certaines propriétés. Pour formuler ces propriétés, nous adoptons les notations données ci-après. Notons M l'ensemble des composants d'un motif. Pour un composant i, nous notons $\Gamma^+(i)$ (respectivement $\Gamma^-(i)$) l'ensemble des successeurs (respectivement l'ensemble des prédécesseurs) du nœud i. Par extension, nous définissons $\Gamma^+(M)$ (respectivement $\Gamma^-(M)$) l'ensemble des successeurs (respectivement prédécesseurs) d'un motif et

Nous recherchons des motifs colorés répondant aux critères suivants :

- 1 : le premier composant du motif est coloré,
- 2 : les autres composants du motif sont colorés ou non,
- 3 :

Nous concentrons notre recherche sur des motifs à k éléments ($k=2$ ou $k=3$) de type série, entremêlé, inclusif ou parallèle, et ceci de manière similaire à ceux proposés par [Demoly et al., 2011]. Chaque fois qu'un motif coloré est identifié, on remplace dans le graphe "FARD Graph" l'ensemble des nœuds et de leurs arcs adjacents constituant ce motif par un seul nœud étiqueté avec la séquence ordonnée des nœuds du motif. Ce nœud étiqueté constitue alors une sous-séquence dans la séquence globale d'assemblage. Et on ajoute des arcs entre ce nœud et les autres nœuds du graphe s'il existe une relation de précedence (avec ou sans contact physique) entre l'un des nœuds du motif et un autre nœud. La condition 3 empêche la création de cycle dans le graphe ainsi obtenu. On répète cette opération de recherche de motifs autant de fois que ceci est possible pour « contracter » au maximum le graphe. Le graphe "FARD Graph" contracté est ainsi obtenu.

3.3.3 Etape 3 : Modélisation et résolution du problème d'ordonnement des modules pour générer des séquences d'assemblage

La dernière étape de l'algorithme consiste à générer des séquences admissibles à partir du graphe « contracté ». Pour réaliser cette génération, nous nous appuyons sur une modélisation CSP (Constraint Satisfaction Problem) [Tsang, 1993]. Pour un graphe orienté $G = (V, E)$, V étant l'ensemble des nœuds et E l'ensemble des arcs, possédant n nœuds et m arcs, les inconnues du problème sont les variables X_i où X_i désigne la position de l'élément i dans la séquence d'assemblage. Cette position est un entier compris entre 1 et n . Les variables doivent satisfaire les deux types de contraintes suivants :

- $X_i \neq X_j$ pour tout couple de nœuds i et j dans V ;
- $X_j \geq X_i + 1$ pour tout arc (i,j) dans E

La résolution du CSP nous fournit tous les couples (X_1, X_2, \dots, X_n) vérifiant les contraintes précédentes. Pour obtenir les séquences d'assemblage correspondantes, il suffit de placer chaque nœud à sa bonne position dans la séquence et remplacer le nœud par son étiquette. L'étiquette d'un nœud correspond à une sous-séquence de composants ordonnée.

La génération de séquences ordonnées admissibles pourrait se faire par l'application d'un algorithme de tri topologique, le graphe étant orienté et acyclique. Cependant, nous préférons la modélisation CSP à un tri topologique car cette modélisation permettra d'intégrer par la suite plus facilement d'autres contraintes liées à la connaissance métier du gammiste expert.

4 ETUDE DE CAS

Pour illustrer notre étude de cas, nous nous proposons d'utiliser un marteau burineur pneumatique, outil servant à décaper tout type de surface (par exemple : retirer le crépis d'un mur, enlever le carrelage d'un sol, ...).

Notre étude de cas ne va prendre en compte que la partie vanne (Figure 3) d'un marteau burineur pneumatique. Cette partie représente un module permettant à l'utilisateur de maintenir l'outil et de le mettre en marche.

Le produit marteau burineur fait partie d'une gamme complète de produits existants sur le marché, mais doté d'une architecture non-modulaire.

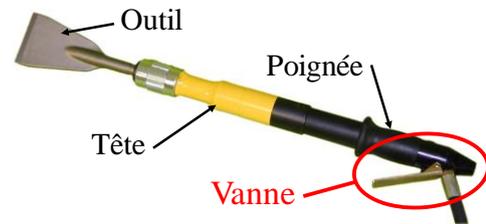


Figure 3 : Exemple de marteau burineur pneumatique

Notre démarche s'inscrit dans le cadre d'une approche hybride de conception, alliant ingénierie innovante et ingénierie routinière. En effet, nous nous appuyons d'abord sur un premier exemplaire de la gamme de produits, pour lequel nous apportons des innovations en ajoutant des nouvelles fonctionnalités (par exemple pour la vanne : la sécurisation de la mise en marche du marteau burineur), et ceci, tout en le rendant modulaire. Ensuite, sur la base de ce nouveau produit, nous appliquons une démarche de conception routinière afin de pouvoir régénérer rapidement toute une nouvelle gamme de produits, en y intégrant systématiquement toutes les innovations proposées.

4.1 Conception fonctionnelle externe du produit

Comme expliqué dans la partie 3 de ce papier, notre méthodologie commence par une analyse fonctionnelle externe du produit. Voici les fonctions de service (FS) et les contraintes (CONS) d'un marteau burineur complet :

- FS1 : permettre à l'utilisateur de décaper un support avec de l'énergie pneumatique
- Cons1 : résister à l'environnement
- Cons2 : respecter les normes européennes

A partir de ces fonctions, un diagramme FAST est réalisé. Il décompose la fonction de service FS1 en fonctions techniques. Etant donné que nous ne considérons que la partie vanne dans ce papier, la fonction technique correspondante à cette partie est la FT3, décrite à la Figure 4. En effet, il existe d'autres fonctions techniques qui permettent à l'appareil de remplir son rôle, mais que nous choisissons de ne pas détailler ici.

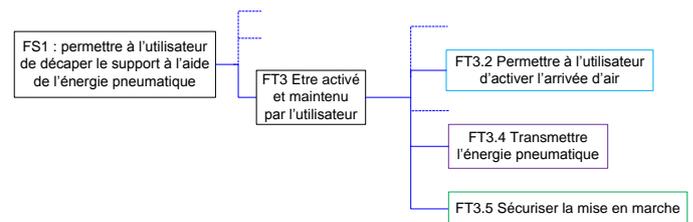


Figure 4 : Partie du FAST correspondant à la vanne

Comme nous pouvons le voir sur la figure précédente, FT3 est décomposée en 3 nouvelles sous-fonctions techniques, pour lesquelles nous avons affecté une couleur (FT3.2 - bleu, FT 3.4 - violet et FT3.5 - vert). Cette partie du FAST décrit l'architecture modulaire de la partie vanne. En effet, nous avons fait le choix de définir un module comme un ensemble de composants indépendant des autres modules et ayant une correspondance unitaire avec une fonction technique.

4.2 Conception fonctionnelle interne de la vanne considérée

A partir de cette étape, nous nous basons sur un concept de solution choisi pour développer la partie vanne du produit complet, qui n'est pas toujours aussi abouti que la Figure 5. En effet, un croquis peut tout à fait être suffisant.

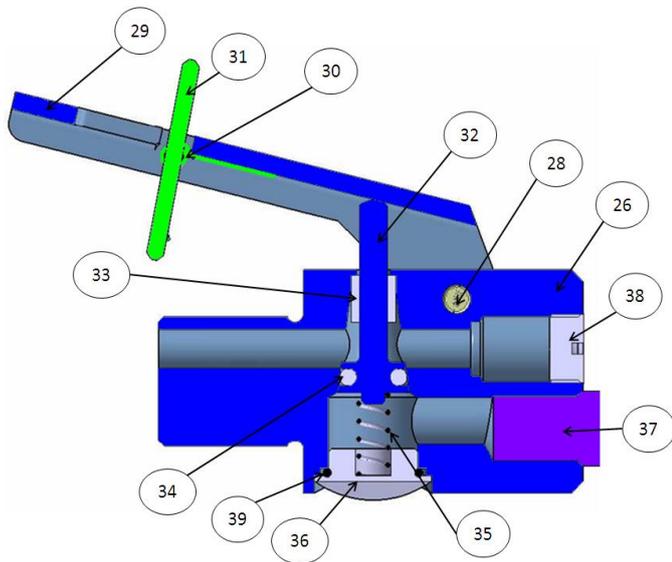


Figure 5 : Détail des composants de la partie vanne

De ce concept, il est alors possible de définir la liste de pièces (Tableau 1) participant au concept. Le tableau ci-dessous correspond à la E-BOM de la partie vanne. Certaines pièces sont colorées en bleu, vert et violet, en tenant compte de leur contribution aux fonctions techniques de plus bas niveau identifiées au niveau du FAST (voir Figure 4).

Pièces	Pièces	Pièces
26 - Vanne	32 - Clapet	37 - Manchette
28 - Vis de la gâchette	33 - Insert	38 - Anti-surpression
29 - Gâchette	34 - Joint torique du clapet	39 - Joint torique du bouchon
30 - Ressort sur la gâchette	35 - Ressort du clapet	
31 - Sécurité de la gâchette	36 - Bouchon	

Tableau 1 : Nomenclature des pièces de la vanne.

Connaissant le concept, les pièces, ainsi que les fonctions techniques, il est possible de définir quelles sont les pièces qui permettent de remplir la fonction de service FS1 à l'aide d'une analyse fonctionnelle interne (le BDF complet du produit n'est pas présenté dans cette expérimentation).

Ayant défini la E-BOM, ou encore appelé vecteur P (pour vecteur Part), la matrice de contact PP (Tableau 2) peut alors être remplie manuellement. Pour cela, il suffit de colorer une case chaque fois qu'il existe un contact entre deux pièces.

A ce stade, le gammiste intervient une première fois pour apporter quelques informations d'assemblage.

Par exemple, les joints toriques sont des pièces presque toujours assemblées sur leur pièce support lorsque le joint est extérieur. Ainsi, il est possible de considérer le joint et sa pièce support comme un sous-ensemble non séparable. Dans le cas d'expérimentation considéré, le joint torique 34 est assemblé au clapet 32 et forment ainsi un nouvel ensemble. La couleur bleue de pièce 32 est alors propagée à la pièce 34, qui était dépourvue de couleur.

Il en est de même pour d'autres exemples singuliers de deux pièces tels que :

- le regroupement des pièces 30 et 31 (la couleur verte de la pièce 31 se propageant alors sur la pièce 30),
- le regroupement des pièces 36 et 39.

	26	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Vanne	26												
Vis de la gâchette	28												
Gâchette	29												
Ressort sur la gâchette	30												
Sécurité de la gâchette	31												
Clapet	32												
Insert	33												
Joint torique du clapet	34												
Ressort du clapet	35												
Bouchon	36												
Manchette	37												
Anti-surpression	38												
Joint torique du bouchon	39												

Tableau 2 : Matrice de contact PP

Par la suite, et grâce à un algorithme de diagonalisation par blocs classique tel que [Kusiak et al., 1994], notre matrice PP est diagonalisée par blocs (Tableau 3). Nous obtenons alors plusieurs blocs à l'intérieur desquels il est possible de diffuser les couleurs des composants colorés précédemment. Les blocs représentent des ensembles ou sous-ensembles comportant une ou plusieurs pièces d'interface permettant de faire le lien entre les différents blocs. Cependant, pour arriver à ce résultat, il a fallu retirer la pièce « 26 - Vanne » qui avait trop d'interactions avec les autres blocs. Il est difficile à ce stade de dire dans quel bloc l'intégrer mais il est sûr qu'il s'agit d'une pièce d'interface ayant de nombreuses interactions avec plusieurs blocs.

		P Vector												
		26	28	29	30-31	32-34	33	35	36-39	37	38			
P Vector	Vanne	26	1											
	Vis de la gâchette	28		2										
	Gâchette	29			3									
	Ressort sur la gâchette	30				4								
	Sécurité de la gâchette	31					4							
	Clapet	32						5						
	Insert	34							5					
	Joint torique du clapet	33								6				
	Ressort du clapet	35									7			
	Bouchon	36										8		
	Joint torique du bouchon	39											8	
Manchette	37												9	
Anti-surpression	38													10

Tableau 3 : Matrice PP diagonalisée par blocs après simplification par le gammiste

En ce qui concerne la propagation de couleur aux autres composants au sein d'un même bloc, plusieurs cas sont possibles :

- Aucun composant coloré dans le bloc, les composants ne sont pas colorés,
- Une seule couleur présente dans le bloc, les autres composants sont colorés à l'exception du composant d'interface sauf si les deux blocs liés ont la même couleur,
- Plusieurs couleurs sont présentes dans un même bloc, aucun composant non coloré lors de l'analyse fonctionnelle interne n'est coloré.

4.3 Définition de la séquence d'assemblage

4.3.1 Etape 1 : Construction, coloration et simplification du graphe des liaisons "FARD Graph"

Pour définir la séquence d'assemblage de la partie du produit considérée, nous allons appliquer notre algorithme qui se base sur un graphe de liaisons. Pour réaliser le graphe de liaisons dont nous avons besoin, nous avons défini une procédure permettant de limiter le nombre d'erreurs humaines. Pour cela, nous réutilisons la matrice PP, utilisée une première fois au niveau de l'analyse fonctionnelle interne, pour générer un graphe de contacts (Figure 6).

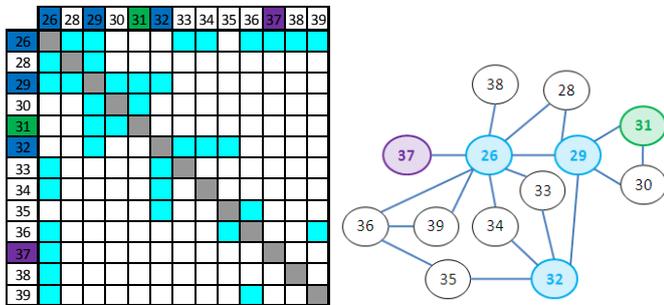


Figure 6 : Génération du graphe de contacts à partir de la matrice PP

L'intérêt de la réutilisation de cette matrice réside dans le fait qu'elle peut être remplie de manière rigoureuse, ligne par ligne. De plus, ceci n'est à faire que sur une demi-matrice car c'est une matrice symétrique. Par comparaison, la réalisation manuelle d'un graphe de liaisons prenant en compte les relations de précedence présente plus de risques d'erreurs humaines.

Le graphe ainsi obtenu est alors complété manuellement afin de représenter l'ordre d'assemblage des composants les uns par rapport aux autres. Ceci permet de mettre en place les relations de précedence avec contact physique. Ensuite, les relations de précedence sans contact physique entre les pièces peuvent également être ajoutées manuellement.

Finalement, les composants sont colorés en fonction des résultats obtenus lors de la diagonalisation par blocs de la matrice PP et de la diffusion des couleurs des composants au sein de celle-ci. De plus, les simplifications apportées par le gammiste sont prises en compte dans le graphe de liaisons Figure 7.

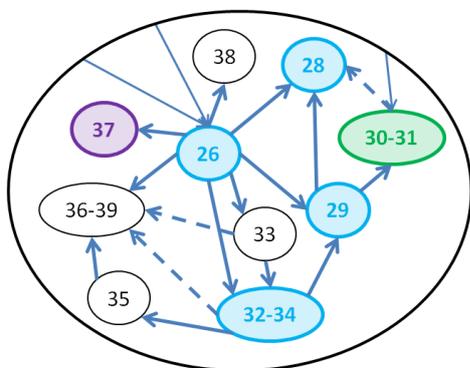


Figure 7 : Graphe des liaisons "FARD Graph" prenant en compte les simplifications apportées par le gammiste

Le gammiste regroupe des ensembles de deux pièces qui sont obligatoirement assemblées ensemble avant d'être incorporées à l'ensemble. Ceci ne pose pas de problème pour la définition des séquences d'assemblage car entre seulement deux

composants du même sous-ensemble il n'y a pas nécessairement besoin de sens d'assemblage. Dans l'exemple, les regroupements concernent principalement les joints toriques et le ressort 30 qui est positionné de manière particulière.

A partir de ce graphe, notre algorithme de génération des séquences d'assemblage ordonnées et admissibles peut être appliqué. Le graphe étant construit, coloré, simplifié (Figure 8) et validé en terme de solution possible, la première étape de cet algorithme est terminée. Par exemple, la relation de précedence entre la pièce 28 et la pièce 29 n'est pas obligatoire, dans la mesure où une relation de précedence existe déjà entre le sous ensemble 30-31 et ces deux pièces.

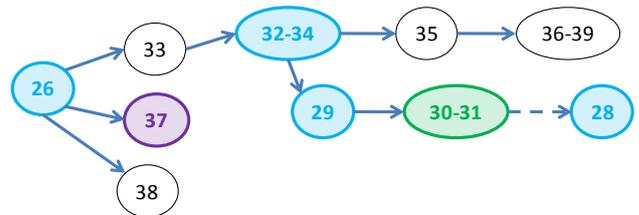


Figure 8 : Graphe simplifié (simplified "FARD Graph"), obtenu à l'issue de l'étape 1 de l'algorithme

4.3.2 Etape 2 : Contraction du graphe par identification de motifs colorés

Maintenant, il faut contracter le graphe par identification des motifs, comme présenté dans l'étape 2 de l'algorithme. A ce niveau, plusieurs solutions sont possibles. La Figure 9 présente une possibilité de graphe contracté suite à l'identification de motifs.

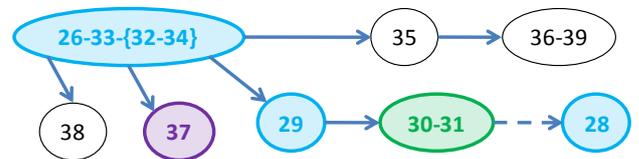


Figure 9 : Exemple de graphe simplifié et contracté (simplified and contracted "FARD Graph"),

4.3.3 Etape 3 : Modélisation et résolution du problème d'ordonnancement des modules pour générer des séquences d'assemblage

La dernière étape est alors la génération des différentes séquences d'assemblage ordonnées et admissibles en fonction de la structure modulaire du produit définie précédemment. Voici quelques exemples de séquences d'assemblage obtenues :

- {26,33,{32,34}},29,{30,31},28,35,{36,39},37,38 ;
- {26,33,{32,34}},35,{36,39},29,{30,31},28,38,37 ;
- {26,33,{32,34}},29,35,38,{30,31},28,{36,39},37 ;
- {26,33,{32,34}},29,{30,31},28,37,38,35,{36,39}.

A partir de ces séquences d'assemblage, le gammiste choisit celle qui lui semble la plus cohérente avec sa connaissance du métier d'assemblage et de son expérience. En ce qui concerne la partie vanne, la séquence d'assemblage finale qui a été sélectionnée par l'expert est : {26,33,{32,34}},29,{30,31},28,35,{36,39},37,38.

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

A travers cet article, nous avons présenté notre démarche de conception fonctionnelle de produits modulaires intégrant, dès les phases amont du processus de conception. Cette démarche

s'appuie sur le modèle FARD qui permet en particulier, la génération semi-automatique de séquences d'assemblage admissibles, dès les phases amont du processus de conception du produit.

Notre contribution se matérialise plus particulièrement au niveau de la démarche qui allie gestion d'un graphe d'assemblage et algorithme de génération des séquences d'assemblage. Les différentes opérations effectuées tiennent compte de la structure modulaire du produit, définie à partir de la décomposition fonctionnelle issue de l'arbre FAST. Les différentes étapes de construction, coloration et simplification du graphe d'assemblage, puis de contraction du graphe par identification de motifs colorés et enfin de modélisation et de résolution du problème d'ordonnement des modules pour générer des séquences d'assemblage, donnent des résultats prometteurs. Leur application à un cas simple, un sous-ensemble vanne, d'un marteau burineur pneumatique, d'environ 13 pièces, a permis de donner des résultats qualifiés d'intéressants par des experts en gamme d'assemblage.

Les étapes suivantes de nos futurs travaux consisteront à mettre à l'épreuve la robustesse de la démarche en la soumettant à des contraintes plus fortes telles que, par exemple :

- L'augmentation du nombre de pièces considérées, en appliquant la démarche au produit marteau burineur tout entier, soit environ 39 pièces, réparties sur 3 modules principaux, au lieu des 13 pièces du module vanne,
- La prise en compte des fonctions autres que les seules fonctions de service. Il s'agit en particulier des fonctions contraintes tel que, par exemple, la fonction "Respecter les normes en vigueur", qui va impacter des fonctions technique telle que "Mettre en sécurité la commande de déclenchement de la vanne".

Un système informatique intégrant l'algorithme proposé est actuellement en cours d'implémentation et devrait permettre d'expérimenter, à plus grande échelle, la démarche proposée, et ceci, en lien avec un système de type PDM (Product Data Management).

Une autre perspective de recherche consistera à tenter de formaliser les connaissances explicites du gammiste expert afin de proposer au concepteur une aide à la décision, lors des opérations de regroupement de pièces, pendant les phases de diagonalisation par bloc de la matrice PP. L'orientation que nous privilégierons sera de construire une ontologie à partir des concepts et termes métiers spécifiques à chaque entreprise, et de permettre au système de retrouver des pièces qui par le passé, ont fait l'objet de regroupements avec d'autres pièces et qui ont été mises en évidence par les gammistes experts. En effet, les regroupements effectués sont le plus souvent dus à certaines pièces remarquables (ressort, joint, rondelle, etc.). Le système développé pourra les identifier, et alerter le concepteur sur leur présence dans le système, en s'appuyant sur les termes référencés dans l'ontologie.

6 RÉFÉRENCES

Bissay A., (2009), Du déploiement d'un système PLM, vers une intégration des connaissances, Thèse de doctorat de

l'université de Lyon 2. 142p.

- Boothroyd G., Dewhurst, P., (1983) Design for Assembly. University of Massachusetts.
- Boothroyd G., Dewhurst P., Knight W., (1994) Product Design for Manufacture and Assembly. Marcel Dekker: New York.
- Bytheway, C. W., (2007) FAST Creativity & Innovation: Rapidly Improving Processes, Product Development and Solving Complex Problems, J. Ross Publishing: United States of America.
- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., Stein, C., (Eds.), (2009) Introduction to Algorithms, 3rd Ed., The MIT Press: Cambridge and London.
- Demoly, F., Gomes S., Eynard B., Rivest L. (2010) PLM-based approach for Assembly Process. Engineering Int. J. Manufacturing Research, Vol. 5, No. 4, 2010.
- Demoly, F., Yan, X.T., Eynard, B., Rivest, L., Gomes, S., (2011) An Assembly-Oriented Design Framework for Product Structure Engineering and Assembly Sequence Planning. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Journal*, 27(1), pp. 33-46.
- Eppinger, S.D., Whitney, D.E., Smith, R.P., Gebala, D.A., (1994) A model-based method for organizing tasks in product development. *Research in Engineering Design*, 6(1), pp. 1-13.
- Fournier, J.C., (2006) Théorie des graphes et applications – Avec exercices et problèmes. Hermès Science Publications et Lavoisier: Paris.
- Gomes S., (2008), Ingénierie à base de connaissances pour une conception, productive, optimisée, collaborative et innovante du système Projet-Produit-Process-Usage, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- Gondran, M., Minoux, M., (1995) Graphes et Algorithmes. Eyrolles.
- Institute of Product Development, Technische Universität München, www.dsmweb.org.
- Kusiak, A., (1999) Engineering Design: Products, Processes, and systems. Academic Press: San Diego.
- Kusiak, A., Larson, N., Wang, J., (1994) Reengineering of design and manufacturing processes. *Computers and Industrial Engineering*, 26(3), pp. 521-536.
- Robert, A., Yan, X.T., Roth, S., Deschinkel, K., Gomes, S., (2011) A new approach to modularity in product development – utilising assembly sequence knowledge. *International Conference on Engineering Design - ICED11*, Copenhagen, Danemark, 15-18 Août.
- Stone, R. B., McAdams, D. A., Kayyalethekkel, V. J., (2004) A product architecture-based conceptual DFA technique. *Design Studies*, 25(3), pp. 301-325.
- Tsang, E.P.K., (1993) Foundations of Constraint Satisfaction, Academic Press: London and San Diego.
- Vareilles, E., (2005) Conception et approches par contraintes : contribution à la mise en œuvre d'un outil d'aide interactif. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.