

Une proposition de méthode pour une Écoconception innovante et créative

Jean VAREILLE¹, Eric COATANEA²

¹ Lab-STICC UMR 6285 & IUT de Brest-Morlaix département GMP Université de Brest, CS 93837 29238 BREST CEDEX 3, France, mel : jean.vareille@univ-brest.fr

² Faculty of Engineering Sciences, Mechanical Engineering and Industrial Systems laboratory, Tampere University of Technology PO Box 527, FI-33101 Tampere Finland, mel: eric.coatanea@tut.fi

THEMATIQUE – Mécanique (génie industriel), sections 60 et 61

RESUME - Nous travaillons sur les méthodes de conception innovantes et créatives. Le but d'un bureau d'études est de passer d'un cahier des charges à la définition d'un système technique. Celui-ci doit être réalisable et respecter différentes contraintes économiques, sociales et environnementales. Nous portons l'accent sur la première étape de la conception qui consiste à décrire les fonctions et services attendus d'un système dans son environnement, ainsi que ses caractéristiques non fonctionnelles. La prise en compte de l'environnement est effectuée en comptabilisant les impacts du système tout au long de sa durée de vie. Nous utilisons l'analyse dimensionnelle pour transcrire le cahier des charges sous une forme permettant de raisonner dans un espace topologique dans lequel toutes les données sont sans dimension donc équivalentes, autorisant toutes les combinaisons mathématiques. Nous présentons un exemple.

Mots-clés — écoconception, innovation, créativité, méthodologie

1. INTRODUCTION

Un bureau d'études est une organisation humaine et matérielle qui définit des systèmes techniques réalisables, répondant aux spécifications de cahiers des charges. Malgré une utilisation intensive des outils numériques, les choix sont effectués par des humains. Les méthodes appliquées décomposent le travail en étapes successives, avec des itérations [1]. En effet dans un système technique de nombreux phénomènes sont interdépendants, les hypothèses de départ doivent souvent être révisées une fois les choix effectués. Des étapes doivent alors être répétées, jusqu'au moment où l'ensemble devient cohérent. Tout temps gagné sur la recherche de données, et sur le temps de calcul [2] permet de converger plus rapidement vers une solution, ce qui a aussi d'importantes conséquences sur les coûts. Tout au long du XXème siècle les bureaux d'études ont surtout développé l'approche calculatoire, laissant peu de place à la créativité qui est plutôt dévolue aux designers. D'autre part la prise en compte de l'environnement était laissée de côté, sauf lorsqu'elle correspondait à des performances mesurables pouvant servir d'arguments commerciaux, comme la consommation et les rejets en gaz à effet de serre d'un moteur.

La globalisation et les problèmes environnementaux changent la donne au sein des bureaux d'études, car il faut y introduire pour des raisons de compétition et de contraintes réglementaires, des méthodes permettant de stimuler la créativité, l'innovation, et simultanément d'y préparer des analyses de cycle de vie (ACV) par l'évaluation des impacts environnementaux. Il faut ajouter que toutes ces activités nouvelles sont aussi corrélées à une production en masse d'objets personnalisés, qui va aller croissante.

Dans cet article nous proposons une approche permettant d'intégrer l'ensemble de ces activités, en y incorporant des méthodes éprouvées associées à des processus de conception connus mais intégrant de nouvelles approches. L'article est composé d'un état de l'art rapide, suivi d'une proposition de méthodologie. Nous présentons ensuite un exemple succinct, suivi d'une conclusion.

2. ÉTAT DE L'ART

Au XIXème siècle, F.Redtenbacher introduisit une méthode de conception basée sur des nombres guides [3]. Une nouvelle machine utilise nécessairement des matériaux et des éléments qui existaient auparavant. Ceux-ci doivent être mis à l'échelle de l'application visée, et choisis en nombres suffisants. Cette vision de la conception a été poussée à son apogée par F.Reuleaux, premier auteur d'un guide du dessinateur [4]. Au XXème siècle les méthodes de calcul ont énormément progressé. Les fondements théoriques de la similitude et de l'analyse dimensionnelle ont été posés. Mais les machines nouvelles ne sont pas toutes des extrapolations de précédentes, parfois il y a des nouveautés dont le succès est perçu comme une rupture. Par exemple au début de XXème siècle, l'automobile et l'aviation sont apparues et ont connu des développements très rapides. Les travaux sur la conception innovante et créative se sont développés dans plusieurs directions. L'une est orientée vers l'innovation et la recherche de solutions créatives comme TRIZ [5], ou la théorie C-K [6]. Une autre progresse vers la prise en compte de l'environnement par exemple l'EBD [7], ou la Méthode de développement en X [8]. En effet toute la matière d'un produit technique provient de l'environnement, le produit technique fonctionne dans son environnement d'usage, et en fin de vie la matière constitutive du produit est rejetée dans l'environnement, ou recyclée. La fabrication, l'utilisation et la fin de vie d'un système technique

sont des processus irréversibles au sens de la thermodynamique. Leur analyse peut être menée au sens des théories des processus irréversibles [9]. Celles-ci ne séparent pas le système étudié du milieu dans lequel il est placé. Tout modèle doit faire intervenir les deux, les interactions internes à chacun, et les échanges entre les deux. Il apparaît nécessaire de trouver une méthodologie dans laquelle les environnements associés à chaque étape du cycle de vie du produit sont décrits explicitement, quantitativement, avec leurs comportements. Au XXIème siècle le bureau d'études se doit de mettre en œuvre une démarche d'évaluation des impacts environnementaux [10] des systèmes qu'il conçoit, afin d'effectuer des ACV.

Une autre évolution de notre siècle est la généralisation de l'approche d'ingénierie dirigée par les modèles (IDM ou MDE). Tout système devra être modélisé pour permettre des simulations, pour générer des codes exécutés pendant son usage, ou par des machines produisant ses éléments, ses protocoles de montage, de démontage, ou de démantèlement. Il s'agit là de l'ambition du langage de modélisation des systèmes techniques SysML. Celui-ci intègre un diagramme de contexte qui décrit le système technique en cours de développement dans son environnement d'usage associé.

Dans le paragraphe suivant nous proposons une méthodologie pour atteindre ces différents objectifs.

3. PROPOSITION DE MÉTHODOLOGIE

Nous introduisons la notion de super-système, constitué par le système technique et son environnement associé. Celui-ci doit être délimité dans l'espace et dans le temps. Nous discernons 3 échelles spatiales de l'environnement associé, l'environnement utile qui est au voisinage du système pendant son utilisation, l'environnement pertinent qui englobe le précédent mais aussi toutes les zones dans lesquelles on puise des ressources pour composer le système technique et toutes les zones impactées par son recyclage ou son rejet dans l'environnement non technique en fin de vie, et enfin l'environnement global. De même nous discernons 3 échelles de temps relatives à ces environnements associés, l'une se rapporte à sa durée d'utilisation, une autre se rapporte à son cycle de vie depuis le début de la conception jusqu'à la fin de vie, une fois le recyclage et le rejet effectués, et la troisième correspond à la durée précédente à laquelle est ajoutée la durée de la réintégration totale du système technique, dans de nouveaux systèmes techniques pour sa part recyclée, pour l'autre, rejetée dans la nature, jusqu'à réhabilitation du milieu.

Dans le cas d'une écoconception il faut tenir compte des contraintes non fonctionnelles en sus de l'analyse habituelle, de la durée de vie, des incidences environnementales après la fin de vie du système. De plus les systèmes durables doivent être maintenables, fiables et d'un fonctionnement sûr. Dans l'espace temps les systèmes techniques donnent lieu à des évaluations dans 9 intervalles emboîtés.

Une fois les échelles spatiales et temporelles des environnements associés définies, nous inventorions les grandeurs influentes et les caractéristiques externes du dispositif à concevoir. Nous écrivons les interactions au sein du super-système et les caractéristiques du système selon le système d'expressions (1) :

$$\{P\} := (\{S\}, \{F\}, \{G\}, \{M(p)\}) \quad (1)$$

Où $\{P\}$ est l'ensemble des performances, $\{S\}$ les fonctions, $\{F\}$ les contraintes (température, pression, etc.), $\{G\}$ la géométrie de l'appareil et de ses composants, $\{M(p)\}$ sont les propriétés des matériaux. Le symbole $:=$ exprime que les performances résultent des choix de conception et des contraintes de fonctionnement. Certaines des fonctions $\{S\}$ s'appliquent aux arguments qui suivent pour l'évaluation des différentes performances. L'écriture (1) s'inspire des expressions symboliques du langage LISP. D'autres fonctions ne sont pas évaluées pour le calcul des performances, mais en sont des opérands. Par exemple le code d'un système embarqué dans le système est une fonction opérationnelle qui peut influencer sur la performance environnementale. La formulation (1) est inspirée de celle proposée par Ashby [11] pour la sélection des matériaux, mais elle en diffère par l'ajout de l'ensemble des fonctions par l'opérateur $:=$ au lieu d'une égalité, et par l'incorporation des fonctions à l'ensemble des variables de conception à définir (ou à lier). Du point de vue du concepteur les constantes du problème sont les spécifications du cahier des charges et l'environnement. Il les traduit en performances (un sous ensemble de $\{P\}$), en fonctions (un sous ensemble de $\{S\}$), en contraintes (un sous ensemble de $\{F\}$). L'ensemble $\{S\}$ contient des fonctions dont certaines représentent les comportements physiques, biologiques, et chimiques, mais aussi d'autres qui sont choisies ou encodées par les concepteurs, comme les asservissements, les logiciels, qui peuvent modifier les comportements du produit en tenant compte d'événements ou de mesures faites par des capteurs.

La méthode TRIZ [5] intervient alors. Les premiers des quarante principes sont généraux, comme les deux premiers qui concernent la segmentation, et le sixième, le groupement. La segmentation incite à séparer des rôles de chacun des éléments, donc à aller vers des solutions abstraites [12]. Le groupement conduit au contraire à aller vers les solutions concrètes [12] dont chaque élément joue plusieurs rôles simultanément. Les autres principes s'adressent plutôt à des interactions physiques et chimiques, à des états de la matière, solide, liquide, gaz, mélanges, aux transitions de phase, ou à des formes, ou à des natures de matériaux, isotropes ou non, à la répartition de la matière dans le volume, matériaux poreux, composites, etc. D'un point de vue global la méthode TRIZ incite à chercher le nombre de variables de conception qu'il faut ajouter pour résoudre une contradiction en la contournant.

Une fois l'ensemble cerné des grandeurs mises en jeu, nous pouvons passer à une analyse dimensionnelle pour créer des groupements sans dimension [13]. Nous utilisons cette technique car elle a fait ses preuves en mécanique des fluides et en pour les échanges thermiques. Nous proposons d'étendre cet usage jusqu'au début de la conception, lorsque tout est variable, sauf ce qui est défini dans le cahier des charges et la réglementation. Les nombres sans dimension et leurs combinaisons sont alors employés comme des critères de choix. Pour illustrer notre proposition, nous développons un exemple dans le prochain paragraphe.

4. EXEMPLE

Nous avons peu d'espace pour décrire l'approche, mais les figures ci-dessous présentent les grandes étapes du processus.

A l'étape 0 (figure 1), le système étudié et son environnement sont représentés. Nous avons choisi comme cas d'étude celui d'un robot autonome sous-marin. Notre objectif est d'analyser le déplacement de cet engin sous l'eau et d'optimiser cette fonction globale du système robot interagissant avec l'environnement liquide. Cet ensemble formant un super-système qui est décrit plus précisément dans la figure 1, côté droit.

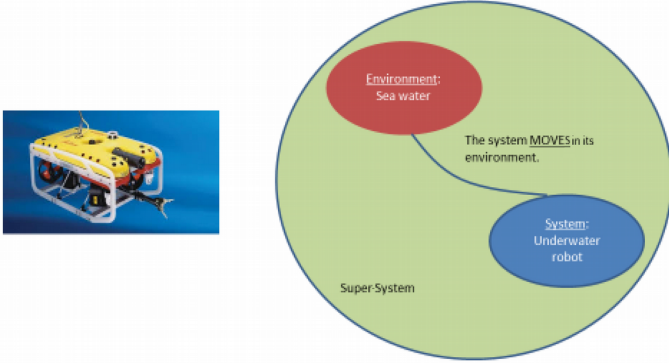


Fig 1 Robot sous-marin autonome dans son environnement.

Lorsque la fonction globale reliant le système et son environnement est décrite, nous pouvons passer à une description plus fine du super-système sous une forme fonctionnelle. C'est ce que la phase 1 de la figure 2 réalise. Dans cette phase le super-système est décrit à l'aide d'un vocabulaire fonctionnel issue des travaux de Hirtz [14] et de ses collègues. Cette description est affinée de façon itérative en utilisant une concrétisation de la représentation sous forme de phase 2 de la figure 2. Dans cette phase un ensemble de briques élémentaires issues de la théorie des Bond Graphs [15] est utilisé. Lorsque le modèle est stabilisé, un ensemble de paramètres génériques permettant de décrire les propriétés fonctionnelles du système sont associés à la représentation de type Bond Graph du super-système. Deux grands types de variables sont définis, des variables externes ou de puissance et des variables d'états. Ces dernières sont associées aux différents organes génériques permettant de représenter l'architecture du système.

Des couleurs sont associées aux variables décrivant les propriétés du super-système, vert pour les variables indépendantes, bleu pour les variables dépendantes, noir pour les variables exogènes. Enfin les variables bleues ou vertes peuvent devenir rouges si elles sont considérées comme des variables décrivant la performance du super-système. Ces dernières peuvent varier au cours du temps et des phases d'analyse du super-système. Lorsque cette phase est réalisée, un graphe causal est généré décrivant en phase 4 de la figure 2, à la fois l'architecture système, les interactions causales entre variables, les boucles de rétroactions ainsi que les variables de performances sélectionnées comme importantes par le concepteur. Ce graphe causal est généré automatiquement à l'aide d'une application informatique développée pour faciliter ce type de modélisation.

Pour décrire plus en détail cette phase, analysons la partie encadrée de la figure 3 représentant le super-système robot mobile dans son environnement.

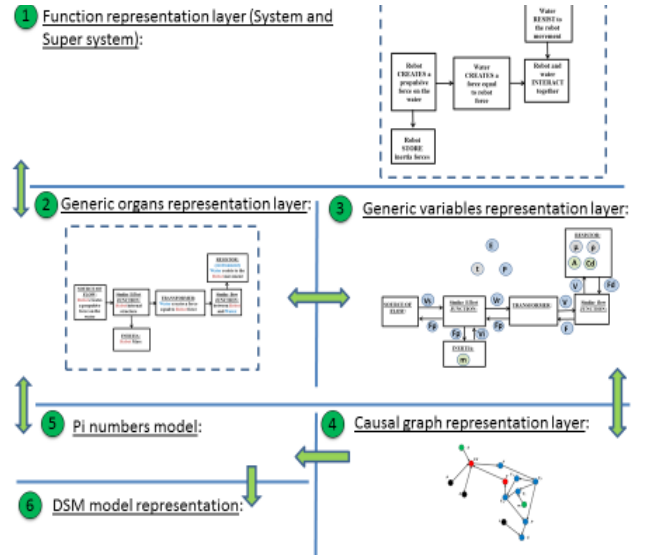


Fig. 2 Représentation du processus de conception proposé

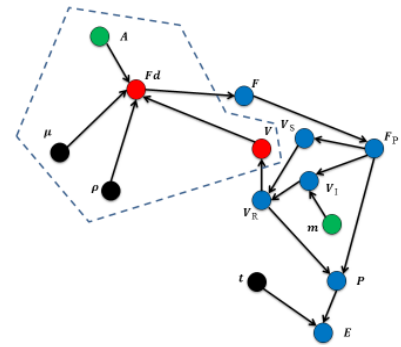


Fig. 3 Graphe causal représentant l'architecture du super-système robot autonome avec son environnement.

A ce stade, l'objectif initial du concepteur est de pouvoir analyser plusieurs options de conception visant à optimiser la fonction principale du système qui est de se mouvoir dans son environnement. En étudiant plus précisément l'interaction du système et de son environnement, une partie du graphe causal peut-être isolée. Celle-ci est entourée par une ligne discontinue sur la figure 3. Le nœud F_d représente la force de traînée générée par le robot, qui est influencée par de nombreux autres nœuds. Chaque nœud influencé par d'autres nœuds donne lieu à la construction d'un nombre sans dimension suivant le théorème de Vashy-Buckingham, selon l'expression (2) :

$$\pi_{Y_i} = y_i \cdot x_j^{\alpha_{ij}} \cdot x_l^{\alpha_{il}} \cdot x_m^{\alpha_{im}} \quad (2)$$

Pour la portion de graphe qui nous intéresse, le nombre créé est le suivant :

$$\pi_{F_d} = F_d \cdot V^{-2} \cdot \rho^{-1} \cdot A^{-1} \quad (3)$$

Dans lequel V est la vitesse relative du robot, ρ la masse volumique de l'eau et où A est homogène à une surface. Ce nombre respecte le principe de l'homogénéité dimensionnelle, il est de dimension 1 [16]. Il peut être interprété comme un coefficient de traînée. Le symbole $=$ pourrait être écrit $:=$ ici.

Une machinerie créée par Bashkar et Nigam [17] permet de raisonner à l'aide de ces nombres sans dimension. L'expression (2) peut-être écrite sous la forme (4) :

$$y_i = \pi_{y_i} \cdot x_j^{-\alpha_{ij}} \cdot x_l^{-\alpha_{il}} \cdot x_m^{-\alpha_{im}} \quad (4)$$

L'expression (4) peut prendre la forme (5) suivante :

$$\frac{y_i}{x_j} = \pi_i \cdot \frac{x_j^{-\alpha_{ij}}}{x_j} \cdot x_l^{-\alpha_{il}} \cdot x_m^{-\alpha_{im}} \quad (5)$$

A partir de l'expression (4) la dérivée partielle par rapport à x_j peut-être écrite, elle prend la forme (6) :

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_j} = -\pi_i \cdot \alpha_{ij} \cdot \frac{x_j^{-\alpha_{ij}}}{x_j} \cdot x_l^{-\alpha_{il}} \cdot x_m^{-\alpha_{im}} \quad (6)$$

Qui prend la forme finale de l'expression (7), qui est vérifiée si le nombre sans dimension Π_i est considéré comme constant.

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_j} = -\alpha_{ij} \frac{y_i}{x_j} \quad (7)$$

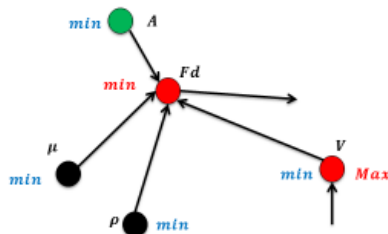


Fig. 4 Objectifs qualitatifs propagés dans le graphe causal (rouge : objectifs, bleus : propagés)

En utilisant la machinerie décrite à l'aide de l'expression (7), il est possible de propager les objectifs qualitatifs rouges dans le graphe et d'obtenir les objectifs bleus. Une contradiction apparaît immédiatement : l'objectif est de maximiser la vitesse du robot V mais celle-ci doit être réduite pour pouvoir minimiser la force de traînée F_d . D'autre part, idéalement il serait intéressant de pouvoir diminuer les deux paramètres exogènes μ (viscosité) et ρ (masse volumique) relatifs à l'eau. Ces paramètres étant exogènes, ils sont à priori impossibles à contrôler. Une solution innovante consisterait à trouver un moyen de les modifier pour minimiser la force de traînée F_d , et par conséquent son impact sur V . Elle consiste à étendre les frontières du système robot en y incorporant la couche limite, sa viscosité et sa densité. Cela peut être réalisé, par exemple la torpille russe Skval éjecte un flux de gaz à sa pointe dans la direction de son déplacement, pour créer une bulle autour d'elle et ainsi diminuer sa traînée. L'étude approfondie des paramètres peut être poursuivie pour établir les différentes options de conception du robot. Pour cela un plan d'expériences virtuel utilisant l'expression 4 ainsi que les ordres de grandeurs des paramètres de l'équation permettent de visualiser l'impact possible de chacun sur la performance de traînée. La figure 5 présente ces pistes de conception. Il est évident qu'agir sur les propriétés du fluide dans lequel circule le robot est une piste de conception peu étudiée pourtant potentiellement pleine de valeur.

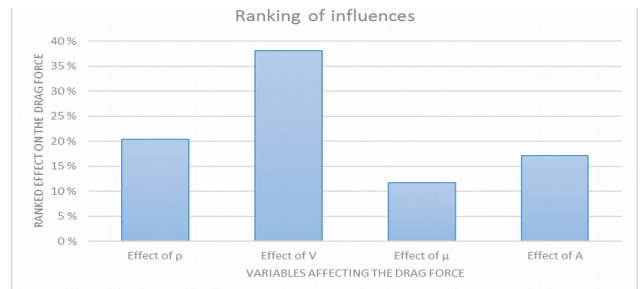


Fig. 5 Influences des différents paramètres sur la force de traînée.

5. CONCLUSION

En appliquant les principes de la méthode TRIZ et notre approche entre autres, il est possible d'introduire de nouveaux champs d'investigation en proposant de modifier drastiquement le milieu environnant, ou une caractéristique de la frontière du système avec celui-ci. Cela correspond à augmenter le nombre de variables mais aussi à ajouter de nouvelles contraintes. Cette façon de procéder devrait permettre de trouver des solutions innovantes de rupture, très créatives.

6. Références

- [1] G.Pahl, W. Beitz, « Konstruktionlehre », Springer-Verlag, 2003-.
- [2] B. Roy. « Méthodologie multicritère d'aide à la décision », Economica, Paris, 1985.
- [3] F.Redtenbacher «Prinzipien der Mechanik und des Maschinenbaues », Friedrich Bassermann, Mannheim 1852-1859.
- [4] F. Reuleaux « Der Constructeur », F. Vieweg und Sohn, 1861.
- [5] G.Altshuller « Et soudain apparut l'inventeur: les idées de TRIZ » 2e éd., EAN 978-2-9521-3941-0, éditeur Seredinski, Poitiers, 2006.
- [6] A.Hatchuel B. Weil, "C-K design theory: An advanced formulation", Research in Engineering Design, 19(4):181-192, 2009.
- [7] Y.Zeng "Environment Based Design (EBD)", International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE, ASME2011, Washington, 2011.
- [8] M.Tahan, J.Vareille, « La méthode de développement en X », CNRIUT2011, Cherbourg, 2011.
- [9] I.Prigogine, « Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles », Dunod, Paris, 1968.
- [10] Global Reporting Initiative, "IP - Indicator Protocol Set Environment: EN", GRI, 2011.
- [11] M.F. Ashby, "Materials Selection in Mechanical Design", Pergamon Press, Oxford 1992.
- [12] G.Simondon « Du mode d'existence des objets techniques », Aubier, Paris, 1958.
- [13] G.Delaplace, K.Loubière, F.Ducept, R.Jeantet, « Modélisation en génie des procédés par analyse dimensionnelle », Lavoisier, Paris, 2014.
- [14] J. Hirtz, R. B. Stone, D. A. McAdams, S. Szykman, and K. L. Wood, "A Functional Basis for Engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Efforts", NIST Technical Note 1447, 2002.
- [15] R.Sanchez, « Application des Bond graphs à la modélisation et à la commande de réseaux électriques à structure variable », PhD, Lille, 2010.
- [16] BIPM, « Brochure sur le système international », section 2,2,3 <http://www.bipm.org/fr/publications/si-brochure/section2-2-3.html> 2014.
- [17] R. Bhaskar, A. Nigam, "Qualitative physics using dimensional analysis", Journal of Artificial Intelligence, Volume 45 Issue 1-2, Sep. 1990 Pages 73 - 111, 1990.