



**HAL**  
open science

# Une méthodologie de conception basée sur l'environnement : la méthode de développement en X.

Jean Vareille

► **To cite this version:**

Jean Vareille. Une méthodologie de conception basée sur l'environnement : la méthode de développement en X.. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. hal-03441265

**HAL Id: hal-03441265**

**<https://hal.science/hal-03441265v1>**

Submitted on 22 Nov 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Une méthodologie de conception basée sur l'environnement : la méthode de développement en X.

J. VAREILLE<sup>a</sup>, M. TAHAN<sup>a</sup> and C. LANGUENOU<sup>b</sup>

a. Université Européenne de Bretagne – Université de Brest, LabSTICC – UMR CNRS 6285,  
20 avenue Victor Le Gorgeu, 29285 BREST

b. LANXIS Ingénierie, Pôle d'innovation de Mescoat, 29 800 LANDERNEAU

## Résumé :

*La méthode de développement en X permet l'utilisation d'indicateurs d'impacts environnementaux lors de la conception, avant de prendre des décisions importantes. La conséquence est une réduction du nombre d'itérations de vérification, en particulier au cours d'une ACV. Dans cet article nous présentons comme exemple la conception d'une boîte de transport. Après le récapitulatif des exigences et l'énoncé de ce qui est attendu du travail de conception, nous formulons des hypothèses générales sur l'environnement du produit. Nous suivons en parallèle les deux branches situées à gauche du X, l'une qui correspond au choix du matériau, l'autre qui correspond à l'optimisation des formes.*

## Abstract :

*The X-development method permits the usage of environmental impact indicators during the design process, before taking important decisions. The targeted consequence is the reduction of the iterations during the design, especially in a LCA. In this article we present as example a case study of the design of a transport box. After a short listing of the requirements, and explaining what is expected as definition of the product after the designing work, we formulate general assumptions about the environment of the product. We follow in parallel the twice-left branches of the X, performing two key choices, the first one about the material and the second one about the optimisation of the shape.*

**Mots clefs :** méthodologie de conception, ingénierie simultanée, analyse du cycle de vie.

## 1 Introduction

Dans cet article, nous proposons une approche globale de la conception de systèmes techniques, en tenant compte des facteurs d'impacts environnementaux tout au long du cycle de vie, ainsi qu'après la fin de vie. Nous partons des constats élémentaires suivants : l'environnement dans lequel est utilisé un système technique existe avant sa création, chaque système est d'abord conçu, ensuite réalisé, pour être utilisé jusqu'à son retrait du service. Chaque objet composant le système est constitué de matière extraite de l'environnement, solide ou fluide. Les déchets produits au cours de l'utilisation d'un système sont rejetés dans l'environnement ou recyclés. En fin de vie, le système lui-même est rejeté ou désassemblé, pour être réutilisé par parties ou recyclé. L'environnement est modifié par le système pendant son cycle de vie, et demeure après sa fin de vie. La première question abordée est de savoir comment faire des produits de valeur plus grande, avec moins de ressources et d'impacts. La seconde est la coordination de branches de métiers très différentes qui n'utilisent pas les mêmes méthodes de développement. La troisième est le passage de l'expression des fonctionnalités attendues, exprimées sous forme de services, à une formulation quantitative pouvant être utilisée par les concepteurs des bureaux d'études.

Nous nous plaçons délibérément dans une perspective d'une évolution vers une économie circulaire. Nous supposons qu'il y aura un glissement des fonctions de service réalisées par des parties matérielles vers des logiciels exécutés par des calculateurs embarqués, dont l'une des qualités sera de les rendre plus économes. Dans la prochaine section nous présentons la méthode de développement en X. Dans la suivante nous introduisons un exemple d'application par le biais de l'étude d'une boîte de transport. Dans la pénultième nous situons cette méthode au sein des théories de la conception. La dernière section conclut l'article.

## 2 La méthode de développement en X

La forme actuelle de la méthode de développement en X a été conçue au sein de notre équipe lors de travaux antérieurs. À partir des constats posés plus haut, nous avons cherché comment associer et combiner les différentes méthodes existantes utilisées pour le développement de systèmes techniques. Nous avons adopté un point de vue rétrospectif ou synthétique que nous exprimons graphiquement.

Comme tout système ne peut être produit que lorsque sa définition est terminée ou tout au moins suffisamment avancée, les matériaux nécessaires pour produire le système doivent être disponibles lorsque la production commence. En utilisant la forme de représentation de la méthode de la cascade ( $\sim$ ) bien connue [1], nous avons ajouté une branche en bas à gauche pour représenter le fait que les matériaux en vrac et les éléments standard doivent être collectés avant le lancement de la production. La représentation obtenue ressemble à la lettre  $\lambda$ . Le point crucial est celui où se rejoignent les branches conception (design), production et collecte. Au-dessus de ce point, se trouve le domaine de l'information, des données, des logiciels et autres, alors qu'en dessous de ce point, se trouve le domaine physique et matériel.

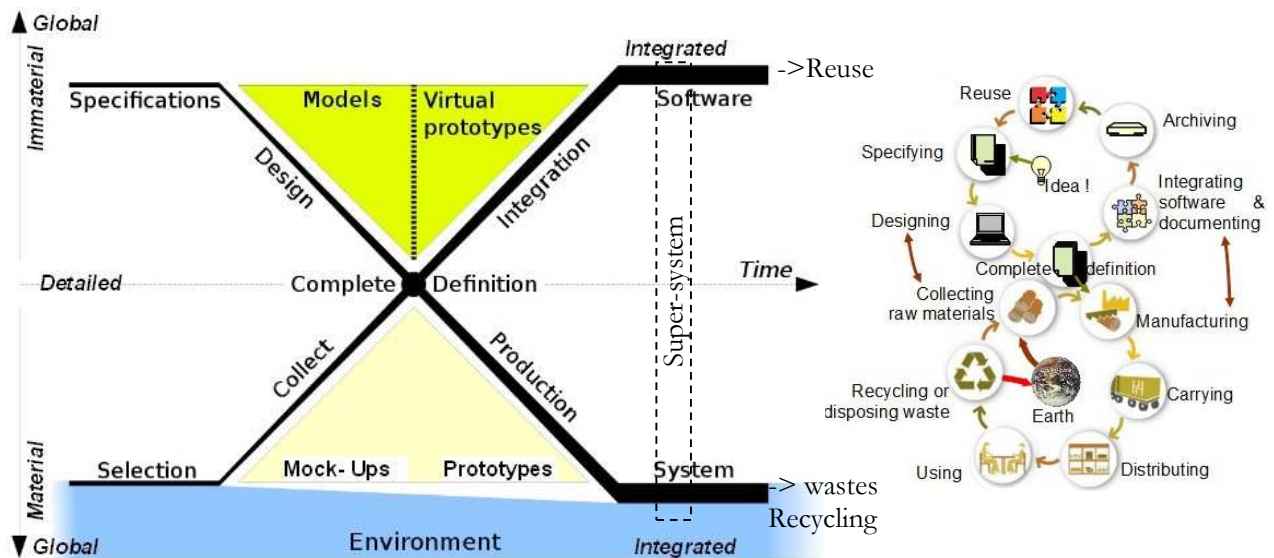


FIG. 1 – À gauche le schéma de la méthode de développement en X, à droite sa présentation cyclique

Nous avons ajouté une branche à droite en haut sur le graphe pour inclure le célèbre cycle en V [2], ce qui conduit à la forme d'un X. Nous avons tracé une flèche horizontale passant par le point central pour représenter le temps. La méthode de développement en X [3] dont le schéma général est présenté sur la gauche de la figure 1, peut être comprise comme un ordonnancement de tâches de type PERT. Chaque segment est une tâche, et chaque nœud une transition entre les tâches adjacentes. La conception commence à l'extrémité de la branche supérieure gauche par la définition du cahier des charges. Tôt au cours de cette étape, le concepteur doit préciser le contexte dans lequel le système fonctionnera et les frontières entre cet environnement et le système. Ensuite, les échanges entre le système et son environnement seront précisés ainsi que les emplacements de ces échanges relativement au produit. Nous appelons «super-système» un modèle composé du produit entouré des milieux extérieurs qui interagissent avec lui, caractérisés en termes de nature, qualité, quantité, position. Sur la figure 1 le super-système est symbolisé par un rectangle tracé en pointillés, son contour peut être considéré comme une fenêtre temporelle qui suit le produit tout au long de son cycle de vie et après. Une difficulté majeure est de savoir comment le délimiter, car il n'est fermé ni à l'équilibre. Au terme de sa délimitation, les connaissances recueillies doivent être suffisantes pour choisir les matériaux et les composants qui doivent être utilisés pour construire la structure du système [3].

En bas du graphique, nous avons ajouté un rectangle pour représenter l'environnement existant avant le début du processus, et demeurant pendant et après la fin du cycle de vie du système. Sa forme rectangulaire signifie qu'il est sujet aux conservations physiques, en particulier celle de la matière. Toute celle utilisée pour construire le système et celles qu'il consomme reviendront à l'environnement du début à la fin de la durée de vie, ou seront recyclées ou bien réutilisées. Le système modifie l'environnement pendant son cycle de vie et après. Négliger des impacts potentiels lors de la conception pourrait avoir à moyen et long terme des conséquences environnementales néfastes. La partie droite de la figure 1 montre la méthode de développement en X sous forme de deux cycles synchronisés où les activités sont répétitives. Le cycle du bas

est celui utilisé lors d'analyse de cycle de vie (ACV).

À droite du nœud central, le processus de production des pièces et des ensembles commence en dessous de la ligne du temps, au-dessus le processus d'intégration des logiciels se déroule parallèlement. Après avoir parcouru les deux branches le système forme un tout intégré, le logiciel y est généralement incorporé. La ligne en gras à la fin de la ligne droite supérieure signifie que la taille des données, des logiciels et des connaissances augmente. Sur la figure 1 des flèches verticales ne sont pas tracées, qui correspondent à des échanges d'informations entre l'équipe qui s'occupe de la conception et celle en charge de la sélection et de la collecte, puis entre celle qui produit et celle qui intègre. Les quantités physiquement dimensionnées en dessous de la ligne du temps sont associées à des variables et paramètres sans dimension au-dessus.

Nous énumérons les quantités chiffrées et leurs dimensions physiques, afin de procéder à une analyse dimensionnelle pour obtenir deux expressions du même problème, la première utilisant des variables et paramètres dimensionnés, la seconde employant des nombres sans dimension [3][4]. L'utilisation de variables et paramètres sans dimension est fréquente en bureau d'études. Par exemple le nombre de Sommerfeld est utilisé lors du dimensionnement de paliers lisses, les nombres de Reynolds, Nusselt, Prandtl, Grashof sont employés en thermique. Nous proposons de généraliser leur usage en conception afin de pouvoir raisonner sur des schémas de principes indépendants des échelles, et de faire des calculs préliminaires dont les résultats soient transposables à l'échelle réelle. Nous divisons les quantités physiques en catégories : performances, contraintes, caractéristiques géométriques et propriétés des matériaux. Nous ajoutons des indicateurs environnementaux de la GRI [5] en tant que performances à atteindre ou contraintes selon le cas. Nous désignons par  $\{P\}$  l'ensemble des performances du système,  $\{F\}$  les contraintes,  $\{G\}$  les dimensions et les formes,  $\{M(p)\}$  les combinaisons des propriétés des matériaux. Les performances sont des conséquences des contraintes  $\{F\}$  et des choix portant sur les parties de  $\{G\}$  et de  $\{M(p)\}$  relatives au système. Il en découle l'expression (1) où  $f(\dots)$  reflète les fonctions dans leur sens général :

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

L'opérateur  $:=$  signifie que les performances résultent des contraintes et des choix, à la façon d'une affectation, ce n'est pas une égalité. Le second membre correspond à une formalisation du super-système.

Les matériaux n'ont pas de propriété ayant pour seule dimension physique la longueur, et très peu sont sans dimension. Séparons l'ensemble  $\{F\}$  en deux sous-ensembles, le premier  $\{F_g\}$  contenant uniquement des variables et des paramètres sans dimension comme des angles ou des pourcentages, ainsi que les quantités géométriques homogènes à la longueur, le second  $\{F_{\#}\}$  contenant les autres variables et paramètres. Les deux ensembles d'arguments sont dimensionnellement indépendants. Alors l'expression (1) devient séparable, et peut être écrite sous la forme d'un produit de deux expressions indépendantes, d'où l'expression (2) :

$$\{P\} := f_1(\{F_g\}, \{G\}) * f_2(\{F_{\#}\}, \{M(p)\}) \quad (2)$$

Lorsque des performances sont attendues, les choix de la géométrie et du matériau sont couplés par (2).

Or les propriétés des matériaux forment des domaines discontinus, voir figure 3, donc par nature ce sont plutôt des paramètres, alors que les dimensions géométriques, les angles et les formes sont caractérisés par des quantités continues, donc par nature sont plutôt des variables ajustables. Choisir au plus tôt les matériaux et les composants principaux présente de nombreux avantages. Une seconde équipe, celle des méthodes, pourrait s'occuper dès lors du choix des fournisseurs, des prix et des contrats, réserver des ressources, parallèlement à la conception géométrique. Cette équipe pourrait fournir à la première une date limite de réalisation de la définition complète du système. Mais le choix du matériau d'une pièce induit le choix du procédé de fabrication, ce qui entraîne des contraintes supplémentaires sur les formes. L'ordre séquentiel des tâches de la branche en haut à gauche du X : (modélisation)  $\rightarrow$  (choix du matériau)  $\rightarrow$  (définition géométrique) apparaît meilleur que l'ordre inverse ou le parallélisme.

Dans la section suivante nous montrons une application de la méthode sur le cas d'une boîte de transport.

### 3 Exemple d'application de la méthode, étude d'une boîte de transport

L'objet étudié est une boîte de transport gerbable d'un volume de 100 litres. Elle doit pouvoir supporter une charge maximale de 5000 N en cas d'empilement, avoir quatre poignées, une de chaque côté, et être déplaçable à la main. Ses dimensions intérieures sont L 560 mm, l 360 mm et h 500 mm. L'objectif est de réduire au maximum l'impact environnemental global de la boîte, tout en conservant les performances mécaniques et économiques. Les libertés laissées au concepteur sont de choisir son matériau constitutif et la

répartition de la matière, ses dimensions, son épaisseur, le nervurage, etc.

### 3.1 De l'analyse préliminaire au choix de matériau constitutif

À ce stade, nous considérons le produit immergé dans son environnement proche, lors de son utilisation, jusqu'à la fin de sa durée de vie. En cours d'utilisation la boîte est en contact avec son contenu, l'air, avec les mains de l'utilisateur ou le sol, et occasionnellement avec des liquides tels que de l'eau, des solvants organiques, des détergents. Elle peut être soumise aux actions d'autres boîtes posées sur elle, elle subit évidemment la gravité. Elle peut être utilisée à l'intérieur ou à l'extérieur, doit supporter la lumière solaire. Les principaux critères techniques de performance du produit sont sa légèreté, sa rigidité, sa solidité et sa durée de vie. Pour la sécurité de l'utilisateur, le matériau de la boîte ne doit être fragile ni susceptible de se fracturer en éclats aux arêtes vives. Au-delà de ces performances techniques, nous ajoutons des indicateurs de performances environnementales proposés par la Global Reporting Initiative [5]. Après l'analyse des besoins, nous exprimons les fonctions de service, délimitons le super-système composé du produit et tout ce qui interagit avec lui, et identifions les quantités en jeu, voir figure 2.

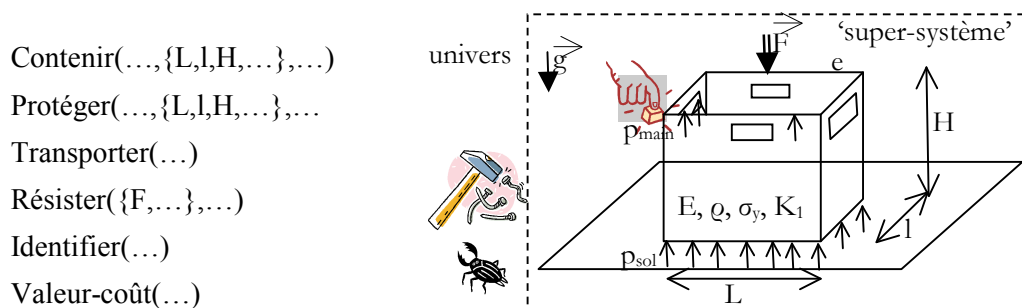


FIG. 2 – Fonctions de service et super-système composé du système immergé dans son voisinage utile

Notons  $\delta$  la déformation de la boîte,  $L \times l \times H$  ses dimensions,  $e$  son épaisseur,  $p_{\text{sol}}$  la pression appliquée par le sol sur la partie inférieure de la boîte,  $p_{\text{bord}}$  la pression appliquée par le contenu sur les faces de la boîte,  $p_{\text{main}}$  la pression appliquée par l'utilisateur,  $F$  la force appliquée par les boîtes superposées. Les propriétés physiques du matériau supposé homogène et isotrope sont  $\rho$  sa masse spécifique, son module d'Young  $E$ , sa résistance élastique en traction  $\sigma_y$ , sa ténacité  $K1c$ . La gravité est notée  $g$ . Ces quantités, sauf  $p_{\text{bord}}$  et  $\delta$ , sont portées sur la figure 2. Le prix spécifique du matériau n'est pas une caractéristique physique, chimique ou biologique, mais une valeur économique fluctuante, par conséquent il n'est utilisé qu'après les quantités précédentes lors de l'évaluation de la fonction Valeur-coût(...) (lire valeur moins coût de). À partir des 14 grandeurs physiques et 3 dimensions physiques (longueur, masse, temps), ce qui nous permet d'écrire 11 nombres sans dimension. Le modèle réel conserve ses 14 variables et paramètres dans le monde physique. Les quantités  $H$ ,  $g$ ,  $F$  peuvent être choisies comme base pour effectuer l'analyse dimensionnelle. Le premier nombre adimensionnel est  $\delta/H$ , il reflète la performance de la rigidité du système. Les autres sont  $L/H$ ,  $l/H$ ,  $e/H$ ,  $p_{\text{sol}}H^2/F$ ,  $p_{\text{main}}H^2/F$ ,  $p_{\text{bord}}H^2/F$ ,  $\rho gH^3/F$ ,  $E H^2/F$ ,  $\sigma_y H^2/F$ ,  $K1cH^{(3/2)}/F$ . Les parois latérales de la boîte risquent de flamber parce qu'elles sont minces et planes par morceaux. Un critère majeur pris en compte pour le flambage est l'élanement  $(E/\sigma_y)^{1/2}$  nombre adimensionnel qui correspond à une formule de corrélation entre deux nombres établis plus haut. Cette approche rejoint l'analyse substance/field de la théorie TRIZ [6].

Nous avons maintenant suffisamment de données pour faire le choix de matériau en utilisant la méthode d'Ashby [7] et le logiciel CES. Les matériaux intéressants minimisent la masse en fonction de leur résistance et de leur rigidité. Les considérations environnementales permettent de classer l'ensemble des matériaux trouvés. Nous introduisons 5 étapes de sélection, lors de la première nous spécifions que le matériau doit être résistant à l'eau et un solvant organique, à la deuxième, nous traçons un graphe de la résistance limite par rapport à la masse spécifique, à la troisième, un graphe du module d'Young en fonction de la masse spécifique, à la quatrième, un graphe de la ténacité en fonction de l'allongement, voir figure 3. La fragilité n'est pas une caractéristique présente dans la base de données de CES, mais elle est liée à la ténacité  $K1c$  et à l'allongement à la rupture en % qui elles sont présentes. Les utilisateurs préfèrent utiliser des objets se déformant sensiblement avant de rompre, cette qualité intervient dans la fonction Protéger(...). Nous terminons à la cinquième étape par la limitation d'un prix spécifique maximal, dans notre cas, 3€5/kg. Le choix d'une matière naturelle comme l'osier (willow) a comme seule limite celle du renouvellement. Le choix d'un acier ou d'un alliage d'aluminium implique de mettre en place un recyclage systématique.

Toutefois ceux-ci retournent à l'état d'oxydes inoffensifs lorsqu'ils sont rejetés dans l'environnement. Par contre dans le cas des matières plastiques, des observations récentes assez inquiétantes [8] montrent que des masses considérables de débris s'accumulent aux voisinages des centres des vortex océaniques, faute d'assimilation par l'environnement. En incluant les océans dans un super-système étendu, moyennant la quantification des échanges, via les indicateurs correspondants nous pourrions tenir compte de tels effets à long terme et à grande distance. Le concept de super-système permet de prendre en compte dès la conception, des effets sur de grandes échelles de temps après la fin de vie d'un produit, en particulier l'indicateur EN12 de la GRI « Description des impacts significatifs des activités, produits et services sur la biodiversité... ».

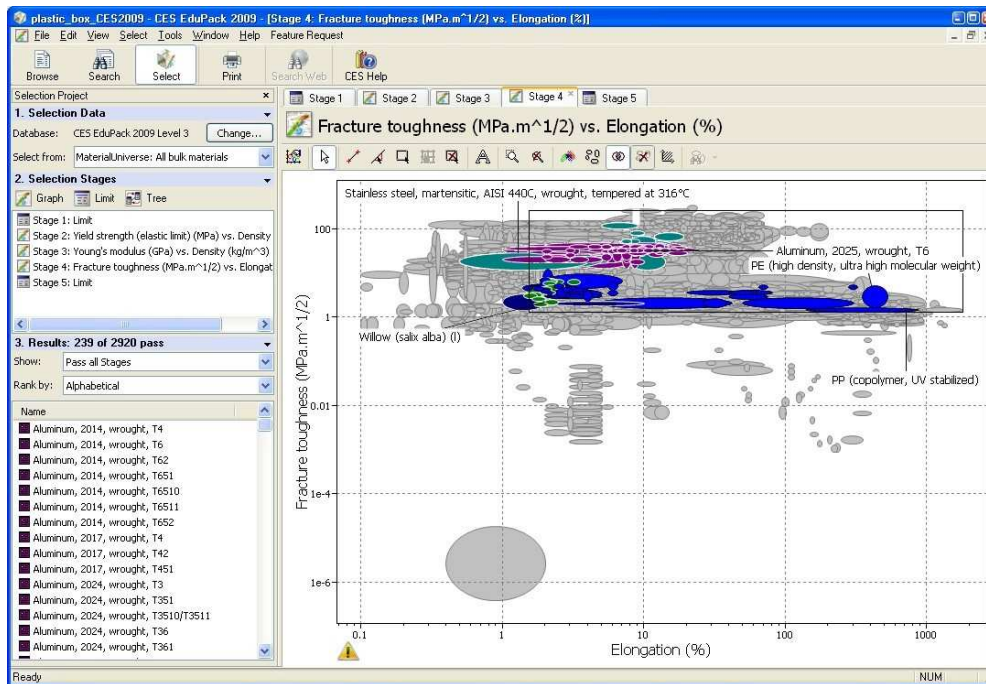


FIG. 3 – Ténacité en fonction de l'allongement relatif à la rupture (CES)

Dans la partie suivante, nous continuons l'étude avec une matière plastique (polyéthylène). Nous montrerons comment réduire considérablement la masse de la boîte grâce à l'optimisation des formes.

### 3.2 Optimisation des formes

La société Lanxis est spécialisée dans l'optimisation conceptuelle topologique et topographique. Elle utilise HyperWorks d'Altair Engineering Inc et LMS de Siemens. Ici l'objectif de l'optimisation est de réduire la masse du produit (indicateur EN1 de la GRI [5]), en maintenant sa rigidité et sa résistance. À partir du modèle géométrique d'une boîte standard disponible dans le commerce, et une répartition des chargements, le logiciel calcule l'épaisseur optimisée et la meilleure position des nervures, avec leurs dimensions. Après la première analyse, nous pouvons construire un modèle géométrique des chargements appliqués au produit. La forme optimisée de la boîte est ici calculée avec HyperWorks (Altair).



FIG. 4 – Le modèle utilisé pour démarrer les calculs d'optimisation

La figure 4 montre le modèle de départ. La figure 5 illustre la répartition des contraintes après optimisation, les nervures qui en découlent, et les résultats obtenus après la modification de la forme. La comparaison entre la répartition des contraintes à l'extrême gauche et celle à l'extrême droite montre une diminution des contraintes de von Mises.

La comparaison entre ces résultats et ceux de la boîte standard du commerce, montre que la masse peut être réduite d'environ 30%, le déplacement maximal sous charge peut être réduit d'environ 38%, et la contrainte

maximale de 32%. Après le processus d'optimisation commence le travail de conception détaillée, en CAO.

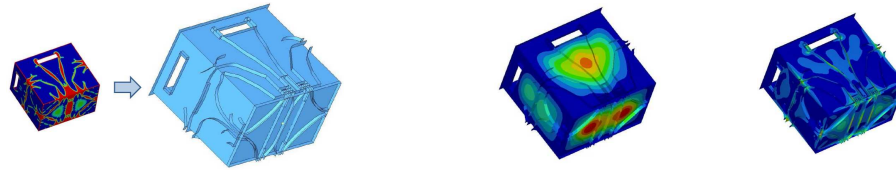


FIG. 5 – De gauche à droite : la répartition des contraintes, les nervures résultantes, les déplacements, les contraintes de von Mises

#### 4 De la méthode de développement en X aux théories de la conception

Le schéma en X ressemble au schéma Y-CIM de A-W.Scheer [9] et au X-Modell de P.Mertens [10], tous deux destinés à la gestion intégrée des entreprises industrielles. La notion de super-système a des points communs avec la pieuvre de la méthode APTE. Les théories de conception sont utiles quand elles sont couplées avec des méthodologies et des outils pour augmenter la productivité de l'activité de conception. La théorie de la conception basée sur l'environnement EBD proposée par Yong Zeng et alii [11], part de principes identiques [12] à ceux de la méthode de développement en X [13]. Ils considèrent que tout dans l'univers pourrait être décrit comme des objets, que tous les éléments utilisés dans les produits proviennent de l'environnement et, qu'en fin de vie, ils y seront rejetés ou recyclés. Ils introduisent une logique avec des opérateurs spécifiques qui correspondent aux inférences des concepteurs. La croissance des connaissances, logiciels et fonctions évoquée dans la partie 2 a une parenté avec la théorie Concept-Knowledge (C-K) [14].

#### 5 Conclusion

Notre objectif est de transcrire le processus industriel de conception sous la forme d'une méthode où des tâches sont effectuées en parallèle, mais où tous les enchaînements passent par un nœud central. Cette méthodologie est associable aux méthodes de développement existantes et à au moins une théorie de la conception. Elle permet de prendre en compte les impacts environnementaux à chaque étape du développement. Nous avons choisi l'exemple d'une boîte de transport pour en montrer un cas d'application.

#### References

- [1] Royce, W.W., Managing the development of large software systems, in Proceedings of IEEE WESCON, 1-9, 1970.
- [2] Hoffman M., Beaumont T., Application Development: Managing the Project Life Cycle, Mc Press, ISBN 1883884454, 1997.
- [3] Vareille J., Tahan M., Le Parc P., Application du développement en X, l'exemple du régulateur de pression revisité. 20<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique . Besançon, 2011.
- [4] Coatanéa E., Conceptual modelling of life cycle design: a modelling and evaluation method based on analogies and dimensionless numbers, PhD Thesis, HUT, Espoo, Finland, 2005.
- [5] Global Reporting Initiative, IP-Indicator Protocol Set Environment: EN, version 3.1, 2011.
- [6] Altshuller, G., Inventive Problem Solving Algorithm: ARIZ-85, GS, 1956-1985.
- [7] Ashby M.F., Materials selection in conceptual design, Mater Sci Tech 5 (6), p. 517-525, 1989.
- [8] Riosa L.M., Mooreb C., Jonesa P.R., Persistent organic pollutants carried by synthetic polymers in the ocean environment, Marine Pollution Bulletin Volume 54, Issue 8, Pages 1230-1237, 2007.
- [9] Scheer A-W., Wirtschaftsinformatik - Referenzmodelle für industrielle Geschäftsprozesse. 7. Auflage, Springer, Berlin, u.a. 1997.
- [10] Mertens P, Integrierte Informationsverarbeitung 1 : Operative Systeme in der Industrie, Gabler, 2004.
- [11] Zeng Y., Environment-based formulation of design problem, Transactions of the SDPS: Journal of Integrated Design and Process Science, Vol. 8, No. 4, pp. 45-63, 2004.
- [12] Zeng Y., Vareille J., Environment based design (EBD) vs. X development: a dialog between theory and retrospection. ICED11. DTU, Kobenhavn , 2011.
- [13] Tahan M., Vareille J., Touil A., Le Parc P., The X development method, a new viewpoint about the Product Lifecycle Management. CRECOS, Aalto University, Helsinki, 2010.
- [14] Hatchuel, A. and Weil, B., C-K design theory: an advanced formulation. Research in Engineering Design, 19(4):181-192, 2009.