



HAL
open science

Contribution au développement d'une méthode analytique pour l'identification des dépendances et la propagation des changements d'ingénierie en re-conception de produits

Mahmoud Masmoudi

► **To cite this version:**

Mahmoud Masmoudi. Contribution au développement d'une méthode analytique pour l'identification des dépendances et la propagation des changements d'ingénierie en re-conception de produits. Informatique et langage [cs.CL]. Centrale Supélec, 2017. Français. NNT : 2017SACLC021 . tel-01709930

HAL Id: tel-01709930

<https://hal.science/tel-01709930>

Submitted on 22 Feb 2018

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.

NNT : 2017SACL021



THÈSE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY CentraleSupélec
PRÉPARÉE À CENTRALESUPÉLEC

École doctorale n°573

Interfaces : approches interdisciplinaires, fondements,
applications et innovation

Spécialité de doctorat : Sciences et Technologies Industrielles

par

M. MAHMOUD MASMOUDI

Contribution au développement d'une méthode analytique
pour l'identification des dépendances et la propagation des
changements d'ingénierie en re-conception de produits

Thèse présentée et soutenue à "SUPMECA: 3 Rue Fernand Hainaut, 93400 Saint-Ouen", le
vendredi 12 Mai 2017, à 10h.

Composition du Jury :

M. BERNARD YANNOU	Professeur des Universités École Centrale de Paris	(Président du jury)
M. BENOIT EYNARD	Professeur des Universités Université de Technologie de Compiègne	(Rapporteur)
M. ANIS CHELBI	Professeur des Universités École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Tunis	(Rapporteur)
M. FAOUZI MASMOUDI	Professeur des Universités École Nationale d'Ingénieurs de Sfax	(Examineur)
M. MARC ZOLGHADRI	Professeur des Universités SUPMECA	(Co-Directeur)
M. MOHAMED HADDAR	Professeur des Universités École Nationale d'Ingénieurs de Sfax	(Co-Directeur)
M. PATRICE LECLAIRE	Maitre de Conférences SUPMECA	(Co-Encadrant)
M. JAMEL LOUATI	Professeur des Universités École Nationale d'Ingénieurs de Sfax	(Invité)

Résumé

La gestion des changements d'ingénierie, appelée aussi ingénierie du changement, est un domaine de recherche qui s'intéresse à l'étude des changements et des modifications apportés par les concepteurs industriels sur un produit durant l'une des phases de son cycle de vie. Ces changements peuvent exister dans le cadre de renouvellement d'un produit dans un but d'amélioration ou de re-conception. Dans la littérature, plusieurs méthodes et outils ont été mis en place pour évaluer l'impact d'un changement en utilisant les dépendances existantes entre les éléments d'un produit, prédire de façon efficace la propagation du changement et évaluer ensuite ses conséquences possibles. Mais aucun d'entre eux n'a tenté de caractériser la relation de dépendance sous la forme d'une fonction polynomiale, en plus des caractérisations classiques par valeurs qualitatives et quantitatives. Nous proposons donc, une nouvelle méthode pour générer les variations possibles d'un changement, afin de modéliser ces variations par paire sous formule analytique, d'étendre les variations par paire aux variations de plusieurs variables et de vérifier formellement la cohérence des résultats obtenus. Visuellement, un graphe de dépendance est construit où les nœuds représentent les éléments de produit et les arcs portent les fonctions qui les relient. Nos résultats montrent que cette caractérisation fonctionnelle de la dépendance est instructive et permet une propagation de changement et une évaluation efficace. Un modèle géométrique 2D d'un vélo est utilisé pour illustrer l'approche proposée.

Abstract

Engineering Change Management, also known as Change Engineering, is the research domain that focuses on the study of changes and modifications brought by industrial designers on a product during one of the phases of its life cycle. These changes can exist in the case of product renewal for improvement or re-design. In the literature, several methods and tools have proposed to assess the change impact using the existing dependencies between the product components, predict effectively the change propagation and then evaluate its possible consequences. However, none of them attempted to characterize the dependency relationship in the form of a polynomial function in addition to the qualitative and quantitative values. Therefore, we propose, a new method to generate change variations, in order to model these variations in pairs with an analytical formula, expand the variations in pairs to changes in several variables and formally check the consistency of the results obtained. Visually, a dependency graph is constructed where nodes represent the components of product and edges are the functions that connect them. Our results show that this functional characterization of dependency allows an effective assessment of change propagation. A bike with 2-D geometric model is used to illustrate the proposed approach.

Dédicaces

Afin d'être reconnaissant envers ceux qui m'ont appuyé et encouragé à effectuer ce travail de recherche, je dédie ce mémoire :

*À la mémoire de mon grand père **Habib**, qui a été toujours dans mon esprit et dans mon cœur, que Dieu, le miséricordieux, vous accueille dans son éternel paradis.*

*À ceux qui sont toujours mon meilleur exemple dans la vie, ma raison d'être : mes chers parents, **Nouri** et **Amel**, pour les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon éducation, pour leur amour et affection.*

*Au symbole de tendresse et de douceur, mes sœurs : **Rahma** et **Raouia** et mon petit frère **Fayçal**, vous êtes la lanterne qui éclaire mon chemin et m'illumine de douceur et d'amour.*

*À mes beaux-frères, **Amir** et **Idriss** qui sont toujours là pour me soutenir et m'encourager.*

*À mes petits anges, mes neveux **Youssef** et **Yessine**, ainsi que ma petite nièce **Maram** qui ne cessent d'illuminer ma vie par leurs innocences et leurs amours.*

*À mon cher cousin **Anis** et sa famille, en témoignage de leur encouragements et soutiens.*

À tous mes amis, avec qui j'ai grandi et partagé plein d'agréables moments inoubliables.

À tous les enseignants auxquels je dois ce que je suis maintenant.

Masmoudi Mahmoud

Remerciements

Cette thèse de Doctorat a été réalisée dans le cadre d'une convention de tutelle entre l'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS) et Centrale-Supélec. Les recherches qui font l'objet de ce mémoire ont été réalisées en France, au sein du laboratoire Quartz, située à l'Institut Supérieur de Mécanique de Paris (SUPMECA). Par ces quelques lignes, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de cette thèse, en espérant n'avoir oublié personne.

Je tiens à remercier spécialement mon directeur de thèse Français **Pr. Marc ZOLGHARDRI** (directeur de l'équipe systèmes durables au laboratoire Quartz). Je vous remercie d'avoir cru en mes capacités, pour le temps et la patience que vous m'avez accordés tout au long de ces trois années. J'ai beaucoup apprécié travailler à vos côtés tant sur le plan scientifique que sur le plan humain. Je garde toujours beaucoup de plaisir à discuter avec vous et à bénéficier de vos conseils.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse Tunisien **Pr. Mohamed HADDAR** (directeur du Laboratoire de Mécanique, Modélisation et Productique (LA2MP)) d'avoir bien assuré la direction et l'encadrement de mes travaux de thèse. Merci pour votre gentillesse, vos qualités humaines, votre patience et vos précieux conseils.

Je tiens à remercier mon co-encadrant de thèse **Dr. Patrice LECLAIRE**, à qui j'adresse mes remerciements les plus sincères pour sa disponibilité, ses conseils, ses encouragements et ses qualités humaines.

Je remercie **Pr. Benoît EYNARD** et **Pr. Anis CHALBI** d'avoir accepté de rapporter cette thèse. Vos remarques pertinentes et vos conseils précieux m'ont beaucoup aidé à améliorer la qualité de ce travail. Soyez assurés, chers professeurs, de mon estime et de ma profonde gratitude.

Mes sincères remerciements et ma gratitude vont aussi à **Pr. Bernard YANNOU** pour avoir accepté de juger ce travail et d'en présider le jury de soutenance. Que vous soyez assuré de mon entière reconnaissance.

Merci également Monsieur **Pr. Faouzi MASMOUDI** qui a accepté de juger ce travail en tant qu'examineur. Je lui adresse mes sentiments les plus respectueux.

Un merci aussi à Monsieur **Pr. Jamel LOUATI** qui a accepté notre invitation pour être présent le jour de la soutenance.

Je remercie très chaleureusement les membres de l'équipe systèmes durables du laboratoire Quartz qui m'ont beaucoup aidé et encouragé : Roberta COSTA AFFONSO, Florent COUFFIN, Veronique DA SILVA, Caroline BOURCIER, Shirin MIRDAMADI, Thierno DIALLO et mes chers Cothésards : Bacem SAMET, Mariem BESBES et Yun Long FENG. Je leur souhaite tous une très belle aventure. Sans oublier l'ex-membre de l'équipe Pr. Vincent CHEUTET. Je remercie également tous les membres du laboratoire Quartz.

Je remercie aussi tous les membres du Laboratoire de Mécanique, Modélisation et Productique (LA2MP) pour la sympathie et l'aide qu'ils m'ont témoignées durant ces années de dur labeur.

Un grand merci aussi pour mes amis de Paris : Syrine, Ahmed, Rahma, Slim, Hana, Malek, Mouna et Wassim pour leur aide et leur soutien avec mes sincères vœux de réussite.

Table des matières

Résumés	i
Dédicaces	ii
Remerciements	iii
Table des matières	v
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	x
1 Contexte et problématique	1
1.1 Motivation industrielle	2
1.2 Problématique de la thèse	4
1.3 Spécificité de l'étude	5
1.4 Structuration de la thèse	6
2 État de l'art	8
2.1 Introduction	10
2.2 Conception et développement produit	10
2.2.1 Cycle de vie des produits	10
2.2.2 Processus de conception	12
2.2.3 Conception et complexité des systèmes	14
2.2.4 La modélisation des produits industriels	15
2.2.4.1 Définition d'un modèle	15
2.2.4.2 Modélisation d'un produit	15
2.2.4.3 Modélisation géométrique des produits	15
2.2.5 Typologie de la conception	16
2.2.5.1 La conception initiale	16
2.2.5.2 La re-conception	16
2.2.6 Prise en compte des changements dans l'ingénierie système et les outils PLM	17
2.3 Gestion des changements d'ingénierie (ECM)	18
2.3.1 L'ingénierie du changement	18
2.3.1.1 Définition de la notion Changement	18
2.3.1.2 Processus de l'ECM	19
2.3.2 Les méthodes de propagation des changements	21
2.3.2.1 Caractérisation des changements	21
2.3.2.2 Modélisation des dépendances	21
2.3.2.3 Propagation du changement	24
2.3.2.4 Visualisation de la propagation	28
2.3.2.5 Autres classifications	29
2.4 Conclusion de l'état de l'art	30

2.4.1	Explicitation des connaissances théoriques : Modèle de dépendance théorique	30
2.4.2	Techniques d'identification expérimentales : Modèle de dépendance a posteriori	31
2.4.3	Classification des méthodes	32
2.4.4	Motivations pour la recherche menée	32
3	Identification des dépendances	35
3.1	Introduction	36
3.2	Définitions	37
3.3	Formulation du problème	38
3.3.1	Hypothèses	38
3.3.2	Graphes et matrices	38
3.4	Présentation de la méthode d'identification proposée	39
3.4.1	Étape 1 : La modélisation du système	40
3.4.2	Étape 2 : La simulation des changements par variation libre	41
3.4.3	Étape 3 : L'identification préliminaire	42
3.4.4	Étape 4 : La simulation des changements par variation contrôlée	44
3.4.5	Étape 5 : La caractérisation des dépendances	45
3.4.6	Étape 6 : L'établissement du graphe de dépendance	50
3.5	Analyse des données et caractérisation des dépendances	52
3.6	Conclusion	54
4	Propagation des changements	56
4.1	Introduction	57
4.2	Définitions liées à la propagation	59
4.2.1	Nœud instigateur de propagation	59
4.2.2	Nœud d'arrêt de propagation	59
4.2.3	Nœud intermédiaire	59
4.2.4	Chemin de propagation	59
4.2.5	Arbre de propagation	59
4.2.6	Couche de propagation	59
4.3	Formulation du problème de propagation	60
4.4	Principes de la propagation des changements	60
4.4.1	Structure de dépendance en série	61
4.4.2	Structure de dépendance en fourche	62
4.5	Proposition de méthode pour la propagation des changements	63
4.5.1	La méthode Layer propagation (par couches)	63
4.5.2	La méthode Path propagation (par chemins)	65
4.6	Application des deux méthodes sur un cas illustratif	67
4.6.1	Méthode de propagation par couches	67
4.6.2	Méthode de propagation par chemin	69
4.6.3	Comparaison des deux méthodes	70
4.7	Exploitation de la propagation du changement pour la conception	73
4.8	Conclusion	74
5	Étude de cas	75
5.1	Introduction	76
5.2	Le cas du vélo	76
5.3	Application de la méthode d'identification (étape par étape)	80
5.3.1	Étape 1 : La modélisation du système	80
5.3.2	Étape 2 : La simulation des changements par variation libre	82
5.3.3	Étape 3 : L'identification préliminaire	83

5.3.4	Étape 4 : La simulation des changements par variation contrôlée	86
5.3.5	Étape 5 : La caractérisation des dépendances	87
5.3.6	Étape 6 : L'établissement du graphe de dépendance	87
5.3.7	Différentes technologies utilisés pour l'application de la méthode d'identification des dépendances :	88
5.4	Vérification	90
5.5	Application de la propagation des changements sur le vélo	91
5.5.1	Méthode de propagation par chemin	93
5.5.2	Méthode de propagation par couche	93
5.6	Conclusion	97
	Conclusions et perspectives	98
A	Algorithmes annexes	I
B	Outils pour l'identification des dépendances	V
B.1	Logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO)	V
B.2	Techniques de discrétisation : les plans d'expériences	VI
B.3	Analyses de régression	VI
B.3.1	Régression linéaire simple	VI
B.3.2	Régression polynomiale	VII
B.4	Dérivée et différentielle	VIII
C	Vérification des résultats de simulation	X

Liste des figures

1.1	Structuration de la thèse	6
2.1	Étapes du cycle de vie [KOTLER et al., 1996]	11
2.2	Cycle de vie technique [DUQUE CICERI et al., 2009]	11
2.3	Modélisation détaillée du cycle de vie intégrant les notions de re-conception/upgrade	12
2.4	Processus générique de conception et de développement produit [ULRICH et EPPINGER, 2003]	12
2.5	Modèle NRLP d'évolution du produit [ZHANG, 2013]	13
2.6	Processus itératif de développement produit [ULRICH et EPPINGER, 2003]	14
2.7	Processus de développement pour les systèmes complexes [ULRICH et EPPINGER, 2003]	14
2.8	Processus de l'ingénierie du changement selon JARRATT et al. [2004, 2011]	20
2.9	Exemple de DSM avec six éléments	22
2.10	Exemple d'un graphe d'ordre 5 et de taille 15	23
2.11	Méthode de CHENG et CHU [2012]	26
2.12	Exemple de dépendance [RUTKA et al., 2006]	26
2.13	Graphe de dépendance réduit [KUSIAK et WANG, 1995]	27
2.14	Analyse de la littérature selon les 3P [ZHANG, 2013]	29
3.1	Approche générale pour la rénovation d'un produit	36
3.2	Les six étapes de la méthode proposée	39
3.3	Méthode de discrétisation avec pas d'échantillonnage fixe	42
3.4	1ère méthode de discrétisation avec pas d'échantillonnage variable	42
3.5	2ème méthode de discrétisation avec pas d'échantillonnage variable	43
3.6	Graphe de dépendance pour l'exemple	44
3.7	Processus d'analyse de régression	47
3.8	Courbes de dépendances des variations par simulation contrôlée	48
3.9	Courbes de dépendances des variations par simulation libre	51
3.10	Cycles de dépendance qualitative	52
3.11	Dépendance polynomiale et caractérisation	53
3.12	Exemple de graphe de dépendance	54
4.1	Un graphe de dépendance	58
4.2	Arbre de propagation d'un changement survenu sur le nœud A	60
4.3	Structure de dépendance en série	61
4.4	Structure de dépendance en fourche	62
4.5	Graphe de propagation des changements	64
4.6	Arbre et chemins de propagation	66
4.7	Exemple illustratif	68
5.1	Les composants du vélo	76
5.2	Classification des composants du vélo	77
5.3	Liste d'attributs des composants du vélo	78

5.4	Modèles fonctionnel et physique du vélo	79
5.5	Modèle CAO du vélo sous CATIA	80
5.6	Paramètres géométriques du modèle géométrique	81
5.7	Modèle d'un vélo non cyclable	82
5.8	Présentation de l'outil de changement développé	83
5.9	Graphe de dépendance binaire	84
5.10	Graphe de dépendance qualitatif	86
5.11	Exemples de représentation des dépendances	87
5.12	Réduction du graphe de dépendance	88
5.13	Différentes technologies utilisées	89
5.14	Exemple de vérification	90
5.15	Graphe de dépendance de l'étude de cas	92
B.1	Exemple de régression linéaire	VII
B.2	Interprétation géométrique de la dérivée partielle [MELODELIMA, 2011]	VIII

Liste des tableaux

2.1	Classification des méthodes de propagations de changements	33
3.1	Résultats de l'identification préliminaire pour l'exemple	44
3.2	Matrice Binaire B pour l'exemple	44
3.3	Exemples de résultats d'un changement sur le paramètre P_1	48
4.1	Calcul de propagation selon la méthode de propagation par couche	69
4.2	Calcul de propagation selon la méthode de propagation par chemin	70
4.3	Calcul de propagation selon les deux méthodes de propagation	71
5.1	Description des paramètres	81
5.2	Matrice de dépendance binaire	85
5.3	Résultats d'identification des fonctions pour les deux types de simulation . .	90
5.4	Les paramètres du sous-graphe considérés	92
5.5	Extrait de la matrice de dépendance fonctionnelle	93
5.6	Résultats de la méthode de propagation par chemin	94
5.7	Résultats de la méthode de propagation par couche	96
C.1	Tableau de vérification	X

Publications de l'auteur

Communications dans des congrès internationaux avec actes et comité de lecture

Mahmoud Masmoudi, Patrice Leclaire, Marc Zolghadri, and Mohamed Haddar, "Modelling dependencies in Engineering Change Management (ECM)" *In Design and Modeling of Mechanical Systems-II (pp. 161-168). Springer International Publishing, 2015.*

Mahmoud Masmoudi, Patrice Leclaire, Marc Zolghadri, and Mohamed Haddar, "Dependency identification for engineering change management (ECM) : An example of Computer-Aided Design (CAD)-based approach" *In DS 80-3 Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15) Vol 3 : Organisation and Management, 2015.*

Mahmoud Masmoudi, Patrice Leclaire, Marc Zolghadri, and Mohamed Haddar, "Engineering Change Management (ECM) methods : classification according to their dependency models" *The 7th International Congress Design and Modelling of Mechanical Systems (CMSM 17), 27-29 March 2017.*

Mahmoud Masmoudi, Patrice Leclaire, Marc Zolghadri, and Mohamed Haddar, "Engineering Change Management : A novel approach for dependency identification and change propagation for product redesign" *The 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC 2017), 9-14 July 2017.*

Article accepté dans des revues internationales

Mahmoud Masmoudi, Patrice Leclaire, Marc Zolghadri, and Mohamed Haddar, "Change Propagation Prediction : a formal model for 2D geometrical models of products" *The Concurrent Engineering : Research and Applications (CERA), 2017.*

Articles soumis à des revues internationales

Article soumis au Journal of Engineering Design (JED). **Mahmoud Masmoudi**, Marc Zolghadri, Patrice Leclaire, and Mohamed Haddar, "An algebraic-based method to model dependencies for engineering change management ; application to 2D-geometrical models".

Chapitre 1

Contexte et problématique

« The cure for ignorance is to question »

The Prophet Mohamed (s.a.w.s)

Sommaire

1.1 Motivation industrielle	2
1.2 Problématique de la thèse	4
1.3 Spécificité de l'étude	5
1.4 Structuration de la thèse	6

1.1 Motivation industrielle

Durant la phase de conception, le produit évolue constamment. Ces évolutions sont dues à l'intégration des changements (en ingénierie) dont la demande est formulée par le client, par d'autres parties prenantes ou par les concepteurs eux-mêmes. Nous entendons par changement en ingénierie toute évolution partielle d'un produit ou d'un système, nécessitant des modifications de **Form, Fit, Function, and Interface (F3I)** d'un ou plusieurs de ses composants [SEBoK, 2016].

Un produit conçu doit satisfaire une ou plusieurs fonctions dont le client a besoin. Ces besoins peuvent être liés à l'aspect esthétique (design, couleurs), l'aspect économique (prix d'achat, cout de maintenance) ou d'autres aspects (comme le confort, ergonomie, *etc.*). La norme [ANSI/EIA-632, 1999, 132] décrit l'évolution d'une étape de conception en introduisant les exigences clients (notées N)¹, les exigences (notées R), la solution logique (notée L) et enfin la solution physique (notée P). La démarche que nous poursuivons est basée sur ces "états" de produit [ZOLGHADRI et al., 2014]. Les demandes de changement peuvent alors être issues des analyses de chacun de ces "états" du système.

La prise en compte des changements peut nécessiter des modifications des solutions logiques ou physiques envisagées. Chaque changement donne donc lieu à une nouvelle alternative de conception. Une alternative est une solution qui assure les fonctionnalités attendues et respecte les contraintes (technologiques par exemple). Une demande de changement peut être émise suite à une incompatibilité technique (*e.g.* technologie non appropriée), une décision économique (*e.g.* des matériaux moins onéreux) ou la nécessité d'une modification structurelle (*e.g.* un changement géométrique de forme).

De manière plus large, les demandes de changement peuvent être exprimées lors des différentes phases du cycle de vie du produit. Les changements peuvent intervenir une fois que le produit est commercialisé nécessitant alors une re-conception.

L'ensemble des activités requises pour la prise en compte, l'évaluation, l'intégration des changements constitue la gestion des changements (**Engineering Change Management (ECM)**).

En dehors de la conception initiale d'un produit (où le produit est conçu pour la première fois), les demandes de changements peuvent apparaître dans deux contextes différents [ZOLGHADRI et al., 2014] :

- **L'amélioration de produits/systèmes** correspond au terme anglophone "*upgrade*" et désigne le fait de changer le produit/système pour le mettre à niveau et de le faire évoluer d'un état à un autre. Un exemple d'amélioration est la rénovation d'un train afin d'ajouter des nouvelles fonctionnalités (modernisation des affichages par écran LCD, lancement du Wifi à bord du **Train à Grande Vitesse (TGV)**, *etc.*).
- **La re-conception de produits/systèmes** correspond au terme anglophone "*redesign*" et désigne le fait d'appliquer un ensemble de modifications (changements, ajouts, suppressions) sur le produit/système conçu qui peuvent être relatives à sa structure, son comportement et/ou ses fonctions pour concevoir une nouvelle version (ou une nouvelle génération) de produit/système. Un exemple de re-conception est l'ensemble de modifications réalisées sur une voiture de marque VW Golf 6 pour passer à la nouvelle version VW Golf 7.

On pense à un projet d'amélioration si le produit ou le système présente une forte complexité au niveau de la formation de sa structure (nombre d'éléments et de liens très élevés). Dans ce cas, "système" est un terme plus approprié dans la mesure où il reflète cette complexité intrinsèque. Upgrade est donc systématiquement associé à des systèmes dont la phase d'exploitation est beaucoup plus longue que sa phase de conception (train, avion,

1. N pour Needs, R pour Requirements, L pour Logical solution, P pour Physical solution

infrastructure ferroviaire, *etc.*). L'objet d'un projet d'upgrade est donc un exemplaire (parfois quelques exemplaires) d'un système donné. Par conséquent, on rénove une instance opérationnelle (du TGV, par exemple) ayant atteint la limite de performance. Par contre, la re-conception s'adresse à tous les types de produits ou de systèmes et permet de créer une nouvelle génération de produits ou de systèmes. C'est le cas lorsqu'on décide de créer une nouvelle génération de TGV (systèmes complexes à longue durée de service) ou de produits (à une durée de service limitée) tels que les ordinateurs ou smart-phones.

Dans ces deux cas de renouvellement (l'amélioration et la re-conception), le modèle "AS IS" (représentant la situation existante du produit) de conception peut être disponible. Les concepteurs analysent le modèle en changeant les valeurs paramétriques à l'aide d'un outil (ou une démarche) d'optimisation, testant la pertinence de chacune des solutions/alternatives obtenues et prenant une décision finale. Le modèle "TO BE" (représentant la situation future du modèle envisagé) devra donc permettre d'améliorer les performances du produit selon un objectif déterminé. Cet objectif peut être représenté par un indicateur de performance lié au produit (comme l'atteinte d'une valeur d'accélération maximum souhaitée pour une voiture) ou lié au projet en général (comme le coût total du projet ou le temps de réalisation via les considérations de "réalisabilité" moins complexe).

Par contre, dans d'autres situations, le modèle du produit ou du système étudié peut être incomplet voire inexistant, ce qui va nécessiter de créer des modèles pertinents. Ceci est rarement le cas dans les projets de re-conception. Les modèles de la version antérieure du produit ou du système peuvent être disponibles; on doit alors faire évoluer ces modèles. Reste à savoir si les modèles existants sont exploitables pour la re-conception. En contrepartie, le fait d'upgrader un produit, présentant une forte complexité au niveau de sa structure et ses fonctions, nécessitera l'existence des modèles multidisciplinaires.

D'un point de vue gestion de projet, le processus de re-conception ou d'amélioration des systèmes doit suivre une démarche rigoureuse pour réduire au minimum les tâches apportant des modifications sans valeur ajoutée. Les concepteurs sont appelés à fixer des objectifs de performance pour le système étudié durant le projet pour avoir une gestion efficace permettant de minimiser le [Time-To-Market \(TTM\)](#).

Les travaux présentés dans cette thèse sont plutôt adaptés au cas d'amélioration de système et nous supposons que le modèle du produit est inexistant ou existant mais inadéquat à l'étude de renouvellement. Ce renouvellement peut être considéré comme l'application d'un ensemble de changements sur le produit.

La gestion des changements est un enjeu majeur dans l'ingénierie des systèmes d'aujourd'hui. Dans toutes les entreprises, les changements d'ingénierie représentent la règle et non pas l'exception [[CLARK et FUJIMOTO, 1991](#)].

L'occurrence d'un changement peut avoir un impact important sur le produit, mais peut également conduire à une succession de changements due à l'interactivité (dépendance) importante qui existe entre les éléments du produit. Selon [ECKERT et al. \[2004\]](#), la propagation des changements peut créer un effet "boule de neige" qui s'aggrave pendant l'accumulation des changements et résulte en une augmentation de coûts et en un retard de TTM. Ce problème peut aller jusqu'à une avalanche d'activités de changements affectant l'ensemble du produit et impliquant de nombreux intervenants qui doivent collaborer pour développer des solutions technologiques en réponse à ces demandes de changements [[PRASAD, 1996](#)].

On peut mesurer l'importance de la gestion des changements d'ingénierie en prenant quelques exemples cités dans la littérature. [FRICKE et al. \[2000\]](#) ont montré dans leur étude que 30% des travaux journaliers des ingénieurs et des managers dans l'industrie allemande sont reliés directement aux changements d'ingénierie (valeur estimée selon des interviews avec les cadres de l'industrie allemande). Concernant le secteur automobile nord-américain, 350000 changements sont demandés et réalisés par an avec un coût de traitement (sans tenir en compte des coûts d'achat des outils et des matériaux) de 50000\$ dollars Américains

par changement [AIAG, 2012]! La même idée a été confirmée dans l'étude de MAIER et LANGER [2011] faite pour les entreprises danoises en se basant sur un sondage effectué auprès de plus de 90 entreprises de tailles différentes et appartenant à des secteurs de travail variés.

1.2 Problématique de la thèse

La gestion des changements d'ingénierie occupent une place importante au cours de la phase de conception initiale ou de renouvellement. C'est à ce titre que des normes internationales ont été définies afin de clarifier ce processus [ANSI/EIA-649, 1998]. Une gestion adéquate des changements d'ingénierie peut avoir des résultats bénéfiques sur le produit en améliorant son coût de revient, sa qualité mais aussi le délai de sa mise sur le marché ou TTM. La gestion de changement en soi est une activité très complexe et par conséquent très coûteuse en efforts et financièrement, s'il existe plusieurs demandes de changements ou si les changements ont des impacts importants sur le produit entraînant à leur tour de nouveaux changements via un processus de propagation. Dans nos travaux, nous ne nous sommes pas intéressés à la gestion des documents techniques de tels projets qui ont déjà fait l'objet de la norme [ANSI/EIA-649, 1998] et pour laquelle de nombreuses solutions industrielles telles que les outils de Product Lifecycle Management (PLM)/Product Data Management (PDM) existent.

L'objectif de notre recherche est l'amélioration de la qualité de gestion des changements d'ingénierie en évaluant l'impact des changements avec une démarche rigoureuse. Pour une telle évaluation, il est nécessaire de partir d'un modèle du produit existant. Ce modèle joue un rôle clé puisqu'il contient les différents éléments (classiquement ses éléments sont : les sous-ensembles, les pièces, et les paramètres ou attributs correspondants au regard du niveau de détails de modélisation souhaité) définissant le produit ainsi que les liens existants entre ces éléments. Ces liens sont désignés dans ce rapport, et comme dans la majorité des travaux de recherche dans le domaine de gestion des changements d'ingénierie, par le terme de "dépendances".

Dans cette thèse, nous nous positionnons dans le cas de renouvellement dont le modèle de conception peut être disponible, incomplet (il manque des informations sur le type de liens, par exemple) ou inexistant (le cas d'un produit ayant un design très ancien ou perdu). C'est pourquoi, une première étape d'identification des dépendances est nécessaire, ce qui généralement n'est pas détaillé ou explicité dans les travaux réalisés dans la littérature. La construction d'un tel modèle de dépendances du produit s'effectue en cherchant un compromis entre qualité et complexité. En d'autres termes, le modèle de dépendance doit relever d'un niveau de détail, sur les éléments et leurs dépendances, suffisant pour permettre une évaluation de l'impact des changements d'un niveau de précision requis et industriellement acceptable.

Dans ce rapport, nous répondons à trois questions :

Q. 1 Comment peut-on définir les éléments du modèle d'un produit?

Le modèle de conception du produit peut être défini soit par un ensemble de sous-systèmes, de modules, de composants physiques suivant sa nomenclature, que l'on peut ensuite caractériser de manière plus détaillée par des paramètres ou attributs.

Une fois le modèle construit et ses éléments définis, la deuxième question qui se pose est la suivante :

Q. 2 Comment peut-on identifier puis caractériser les dépendances au sein d'un produit?

Dans la littérature, les travaux de recherche sur la caractérisation de dépendances présupposent la connaissance de celles-ci (*i.e.* les éléments qui sont dépendants sont déjà identifiés). Classiquement, on caractérise une dépendance par l'attribution d'une valeur binaire, qualitative ou quantitative. Les dépendances peuvent être incertaines notamment dans le cadre des produits ou systèmes, pour lesquels les modèles initiaux n'existent pas. La prise en compte de ces incertitudes s'effectue de manière probabiliste ou floue. Nous allons montrer (dans le chapitre 3) que dans notre approche la prise en compte de l'incertitude et des connaissances incertaines passe par une modélisation des variations relatives des paramètres dans un intervalle de définition.

Attribuer une valeur quantitative à une dépendance semble être l'approche la plus pertinente car offrant le plus de détails sur la dépendance entre un couple d'éléments du produit et permettant une évaluation quantitative de l'impact dans la phase de propagation d'un changement. Mais cette valeur est attribuée en fonction des valeurs initiales des éléments du modèle et peut mener à des erreurs dans les calculs d'impact durant la phase de propagation. C'est pourquoi, nous cherchons à définir une nouvelle caractérisation des dépendances approximée sous forme de fonctions mathématiques, qui soit indépendante des valeurs initiales et qui reste valide sur un intervalle de valeurs. De plus, nous supposons dans notre étude que ces dépendances ne sont pas toujours identifiées d'avance. Pour cela, nous voulons définir un processus expérimental d'identification par simulation pour identifier les dépendances entre les éléments d'un produit avant de passer à la proposition de cette nouvelle caractérisation.

La troisième et dernière question que nous examinons est alors :

Q. 3 Comment propager la valeur d'impact de changement sur le reste des éléments du produit ?

Une fois le modèle du produit défini (par son architecture et ses éléments) et les dépendances identifiées et caractérisées, nous représentons sous la forme d'une structure de données (matrice ou graphe de dépendance) ces différentes informations pour étudier la propagation du changement.

Contrairement aux méthodes de propagation qui utilisent des données dépendantes du point initial, nous tenons compte de la caractérisation (sous forme de fonctions) des dépendances lors de l'établissement de ce graphe de dépendance avec une connaissance du taux d'erreur associé.

En définissant les valeurs initiales des éléments et le changement demandé (quel élément à changer? et quelle nouvelle valeur?), on parcourt le graphe d'un nœud à un autre pour calculer à l'aide de cette nouvelle caractérisation, les nouvelles valeurs des éléments du produit après la propagation du changement initial.

1.3 Spécificité de l'étude

La conception passe par la réalisation d'un modèle géométrique que l'on doit faire évoluer en plusieurs versions pour tenir compte des spécificités des différentes alternatives de conception successives.

Selon le produit et la nature du changement exprimé, la géométrie du produit peut être amenée à être modifiée pour apporter une réponse à une demande de changement (par exemple, la modification des encombrements d'un nouveau composant). C'est dans ce contexte que nous nous positionnons, car les modèles géométriques, point d'entrée

à toute activité de conception, sont un des premiers types de modèles à être le vecteur (support) d'une propagation d'un changement. Nous proposons une nouvelle approche permettant une évaluation de l'impact d'un changement géométrique pendant la phase de renouvellement d'un produit existant.

1.4 Structuration de la thèse

La structure générale de ce rapport de thèse est représentée dans la Figure 1.1. Ce document est structuré en cinq chapitres : Contexte et problématique, État de l'art, Identification des dépendances, Propagations des changements, Étude de cas.

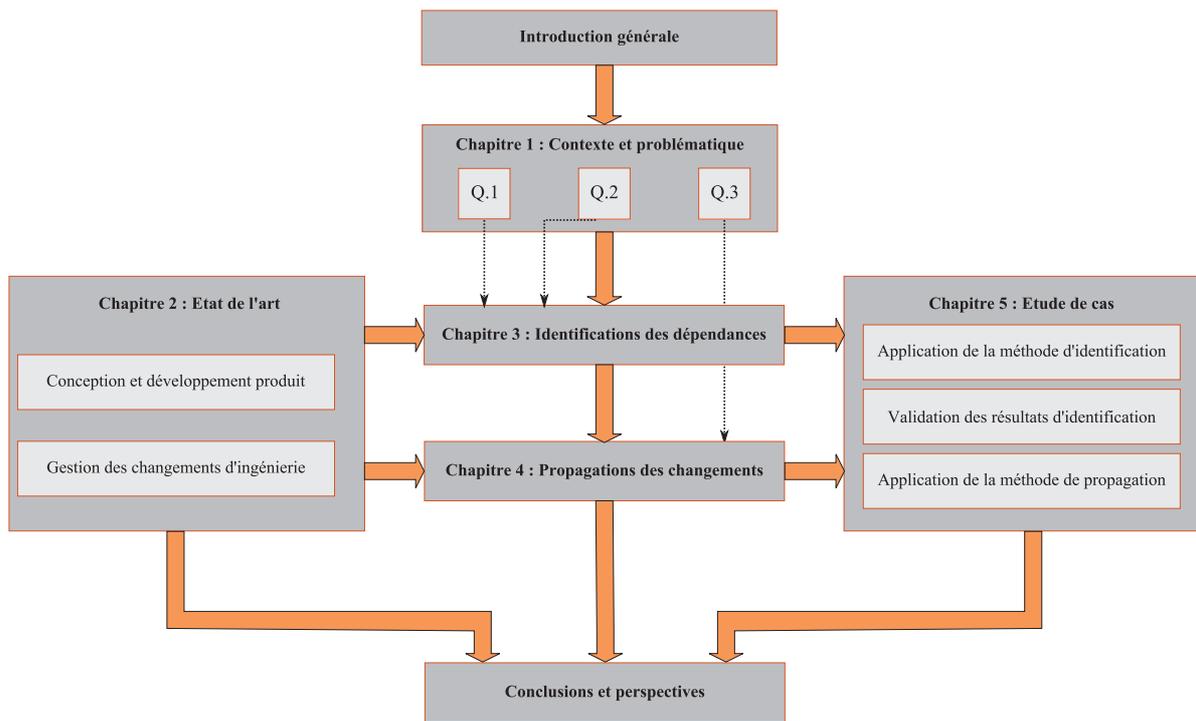


FIGURE 1.1 – Structuration de la thèse

Le chapitre 1 est un chapitre introductif qui a pour objectif de présenter le contexte général de l'étude, la motivation industrielle et la problématique de la thèse.

Le chapitre 2 présente l'état de l'art en 2 parties relatives aux différentes notions abordées dans cette thèse et les communautés de recherche qui s'y intéressent. La première partie se concentre sur les notions de conception, re-conception, cycle de vie des produits, complexité des systèmes et la modélisation des dépendances. Dans la deuxième partie, nous présentons les méthodes et les approches classiques de caractérisation des dépendances et les méthodes de propagation des changements développées dans la littérature. Différentes classifications des travaux sont proposées. A la fin de ce chapitre, une conclusion de l'état de l'art reprend les points clés des deux parties et analysant les problématiques du domaine de gestion des changements d'ingénierie.

L'approche proposée comporte deux phases. Nous décrivons dans le chapitre 3 la première phase de cette approche relative à l'identification des dépendances. Durant cette première phase, nous présentons les deux types de simulations permettant d'identifier et de caractériser les dépendances entre éléments d'un produit : par variation libre et par variation contrôlée ainsi que la détermination du graphe de dépendance en se basant sur la notion de différentielle totale. Ce chapitre permet de répondre aux deux premières questions Q. 1 et Q. 2 posées précédemment concernant l'identification et la caractérisation des dépendances.

Le chapitre 4 concerne la deuxième phase de l'approche proposée portant sur la propagation des changements permettant de répondre à la question **Q. 3**. Nous présentons dans ce chapitre deux méthodes de propagation (et les algorithmes correspondants) : la méthode par couche et la méthode par chemin. Nous les comparons ensuite sur quelques exemples explicatifs.

Dans le chapitre 5, nous présentons l'étude de cas qui illustre les deux phases de notre approche proposée dans les chapitres 3 et 4. Nous commençons par l'application de la méthode d'identification des dépendances pour obtenir le graphe de dépendance correspondant. Nous vérifions ensuite les résultats obtenus par les deux types de simulation afin de valider l'utilisation du théorème de la différentielle totale. Et nous finissons par propager un changement effectué sur une partie du produit.

Le rapport de thèse s'achève avec une conclusion sur les principales contributions et résultats obtenus pendant nos travaux de thèse en donnant quelques perspectives de recherche pour des travaux futurs.

Chapitre 2

État de l'art

« I think it's fairly close. It's accepted as state-of-the-art science, and it's very powerful evidence in that it's science as opposed to personal opinion. »

Paul Moskal

Sommaire

2.1	Introduction	10
2.2	Conception et développement produit	10
2.2.1	Cycle de vie des produits	10
2.2.2	Processus de conception	12
2.2.3	Conception et complexité des systèmes	14
2.2.4	La modélisation des produits industriels	15
2.2.4.1	Définition d'un modèle	15
2.2.4.2	Modélisation d'un produit	15
2.2.4.3	Modélisation géométrique des produits	15
2.2.5	Typologie de la conception	16
2.2.5.1	La conception initiale	16
2.2.5.2	La re-conception	16
2.2.6	Prise en compte des changements dans l'ingénierie système et les outils PLM	17
2.3	Gestion des changements d'ingénierie (ECM)	18
2.3.1	L'ingénierie du changement	18
2.3.1.1	Définition de la notion Changement	18
2.3.1.2	Processus de l'ECM	19
2.3.2	Les méthodes de propagation des changements	21
2.3.2.1	Caractérisation des changements	21
2.3.2.2	Modélisation des dépendances	21
2.3.2.3	Propagation du changement	24
2.3.2.4	Visualisation de la propagation	28
2.3.2.5	Autres classifications	29
2.4	Conclusion de l'état de l'art	30
2.4.1	Explicitation des connaissances théoriques : Modèle de dépendance théorique	30
2.4.2	Techniques d'identification expérimentales : Modèle de dépendance a posteriori	31

2.4.3	Classification des méthodes	32
2.4.4	Motivations pour la recherche menée	32

2.1 Introduction

Tout produit industriel passe obligatoirement par un processus de conception. La conception est considérée comme une activité importante, déterminante voire décisive pour le produit. Durant son cycle de vie, le produit évolue d'un état à un autre et subit des changements et des modifications pour répondre à un ensemble de besoins et d'exigences requis ou exprimés par le client. Dans la phase préliminaire de conception, son architecture (ou sa structure) est définie, puis, en fonction des demandes de changements internes (par les experts de l'entreprise) et/ou externes (e.g. retours d'expérience exprimés par les clients), celle-ci peut être amenée à être modifiable. Tout changement appliqué sur une partie du produit peut entraîner aussi d'autres changements, prévisibles ou non, sur le reste du produit. Cette propagation du changement dans le produit est due à l'existence de dépendances (ou liens) entre les différents éléments du produit.

Le domaine de recherche qui adresse les problématiques possibles relatives à ce contexte est appelé la gestion des changements d'ingénierie ou "*Engineering Change Management (ECM)*" en anglais. Ce deuxième chapitre s'intéresse à fournir les éléments et références de la littérature relative à ce domaine. Cet état de l'art est divisé en deux parties, définies comme suit :

- Conception et développement produit : pour définir les notions liées au processus de conception d'un produit industriel.
- Gestion des changements d'ingénierie (ECM) : pour décrire les méthodes de caractérisation des dépendances et de propagations des changements présentes dans le domaine d'ECM.

Ce chapitre est clôturé par une conclusion de l'état de l'art précisant les problématiques et les questions auxquelles nous allons répondre dans cette thèse.

2.2 Conception et développement produit

La conception peut être considérée comme un processus constitué d'activités de transformation engendrant des changements d'état sur le produit. Selon PAHL et BEITZ [2007], "La conception d'un produit contient une notion de transformation de l'abstrait au concret, d'une idée à un produit, d'un problème à une solution, du fonctionnel au structurel."

La conception des produits est un processus complexe, pendant lequel les concepteurs sont dans l'obligation de trouver des solutions efficaces aux besoins des clients tout en respectant les diverses contraintes issues des différentes phases du cycle de vie (fabrication, maintenance, retrait et recyclage).

Dans cette section, nous allons présenter les différentes phases du cycle de vie des produits, le processus de développement et de conception de produit et finalement les différentes typologies de conception classiquement utilisées dans la littérature.

2.2.1 Cycle de vie des produits

La notion de cycle de vie peut être considérée selon deux points de vue : commercial ou technique. D'une part, un produit atteint une maturité commerciale définie par le volume des ventes du produit. On parle alors de cycle de vie commercial du produit. La figure 2.1 montre la variation du volume des ventes en fonction du temps en parcourant les étapes d'Introduction - Croissance - Maturité - Déclin.

D'autre part, on parle de cycle de vie technique, lorsque l'on s'intéresse aux activités de conception et de production d'un produit. Plusieurs décompositions existent dans la littérature. Par exemple, selon [DUQUE CICERI et al., 2009], ce cycle de vie peut être représenté en trois grandes étapes décomposées en sous étapes. L'étape de début de vie regroupe

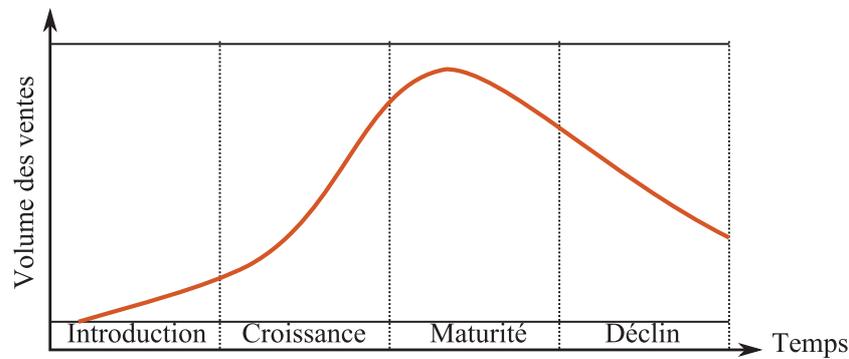


FIGURE 2.1 – Étapes du cycle de vie [KOTLER et al., 1996]

toutes les activités de conception (élaboration du cahier de charge, tests, *etc.*) et de fabrication (production et chaîne logistique interne). Le milieu de vie concerne les activités de distribution (logistique externe et transport), d'utilisation et de soutien (maintenance et réparation). La dernière étape de fin de vie présente le retrait (la destruction et/ou le recyclage) du produit.

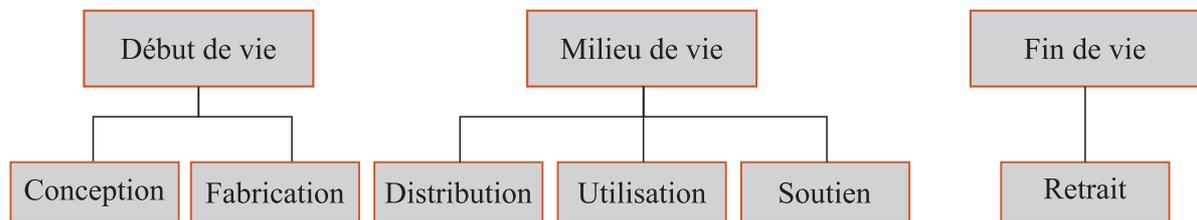


FIGURE 2.2 – Cycle de vie technique [DUQUE CICERI et al., 2009]

Cette modélisation du cycle de vie des produits est inspirée de la norme [ISO/IEC-15288, 2002] qui définit le processus du cycle de vie d'un produit en considérant les 6 étapes suivantes :

- **La conception** : identifier les besoins de la partie prenante (clients), explorer et chercher les concepts et proposer des solutions viables
- **Le développement** : préciser les exigences techniques du système, créer une description pour la solution, construire ou fabriquer un prototype et vérifier et valider le système
- **La production** : produire ou fabriquer le système, contrôler et tester le fonctionnement du système
- **L'utilisation** : gérer le système pour satisfaire les besoins des clients
- **Le soutien** : assurer une capacité de bon fonctionnement
- **Le retrait** : stocker, archiver ou arranger le système

Selon la norme [ISO/IEC-15288, 2002], ces six étapes peuvent être exécutées d'une façon simultanée et les intervenants de chacune des étapes doivent se coopérer et coordonner tout au long du cycle de vie.

Dans une modélisation plus fine du cycle de vie, il convient de représenter les nombreuses boucles de re-conception ou d'upgrade qui peuvent apparaître pendant la phase d'utilisation du produit. Ces boucles représentent les itérations de mises à jour successives du produit selon les besoins d'amélioration d'origine interne ou externe, *cf. Figure 2.3*. Nos travaux se situent précisément au sein de ces boucles de re-conception/upgrade des produits.

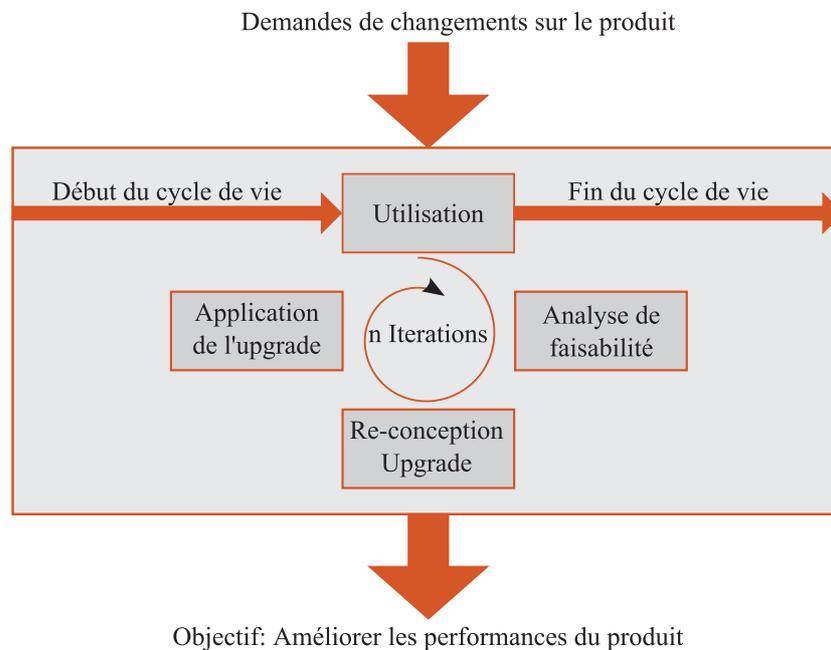


FIGURE 2.3 – Modélisation détaillée du cycle de vie intégrant les notions de re-conception/upgrade

2.2.2 Processus de conception

Selon [HUYSENTRUYT, 2013], le processus de conception peut être défini comme un modèle simplifié (une abstraction) des activités de conception comprenant les sous-processus suivants : (i) l’appropriation des entrées (données collectées lors des phases de projets antérieurs ou provenant d’activités de recherche et développement), (ii) la création et le partage des connaissances dans l’espace virtuel de conception et (iii) la génération des résultats (intermédiaires ou finaux).

ULRICH et EPPINGER [2003] ont proposé un processus de conception et développement de produit générique qui se compose de six étapes, voir Figure 2.4. Un jalon (*milestone*) entre deux étapes indique la fin d’une étape et le début d’une autre, et peut correspondre à une prise de décision et/ou la transmission d’un livrable. ULRICH et EPPINGER [2003] montrent que ces étapes peuvent être vues de plusieurs points de vue selon les différentes fonctions de l’entreprise : marketing, conception, production, *etc.*

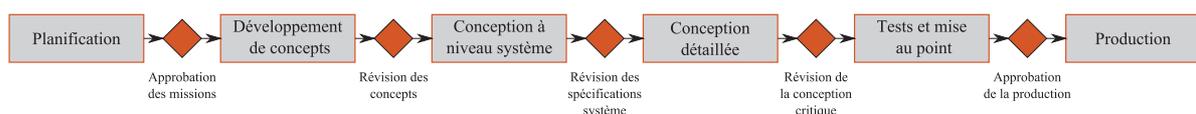


FIGURE 2.4 – Processus générique de conception et de développement produit [ULRICH et EPPINGER, 2003]

Voici la signification de chacune des 6 étapes du point de vue de la conception du produit :

- Etape 1. Planification (*Planning*) :** La première étape correspond à la définition des objectifs du projet de développement du produit, l’étude de la plateforme et l’architecture du produit et l’investigation des nouvelles technologies à incorporer. Cette phase se termine par l’approbation du lancement du projet de conception.
- Etape 2. Développement de concepts (*Concept development*) :** Dans cette étape, les concepteurs étudient la faisabilité des concepts produits (appelés aussi des alternatives de conception) proposés, développent ces concepts de conception industrielle et les testent en fabriquant des prototypes expérimentaux.
- Etape 3. La conception niveau système (*System-Level Design*) :** Il s’agit ici de générer les différentes architectures de produits possibles (la conception préliminaire), de définir

les principaux sous-systèmes et interfaces (suite à la décomposition du produit) et de générer leurs spécifications fonctionnelles. A la fin de cette étape est décidée la disposition/organisation géométrique du produit.

Etape 4. La conception détaillée (*Detail Design*) : Cette étape inclut une spécification complète des paramètres liés à la géométrie, aux matériaux et au tolérancement de toutes les pièces du produit et l'identification de toutes les pièces standards qui doivent être achetées auprès des fournisseurs. Un document de contrôle (*control documentation*) du produit est fourni à la fin de cette étape synthétisant toute ces informations et comprenant les gammes de fabrication et le processus d'assemblage.

Etape 5. Tests et mise au point (*Testing and refinement*) : Dans cette phase, de multiples versions de pré-production du produit (on parle de prototypes interne alpha et externe bêta) sont fabriquées. Un ensemble de tests (test de fiabilité, test de durée de vie, test de performance) est réalisé sur ces prototypes et peut donner lieu à des changements de conception qui seront implémentés sur la version suivante, dans le but d'obtenir les approbations réglementaires.

Etape 6. Production (*Production ramp-up*) : Dans cette phase, les produits sont fabriqués et la main d'œuvre est formée pour résoudre n'importe quel problème lors du processus de production.

En considérant ce processus du projet de développement produit, ZHANG [2013], en s'inspirant de la norme [ANSI/EIA-632, 1999, 132], propose un modèle d'évolution du produit à 4 états pour générer la solution de conception du produit. Dans ce modèle d'évolution de produits, les quatre états sont notés par N pour les besoins (*Needs*), R pour les exigences (*Requirements*), L pour la solution logique (*Logical solution*) et P pour la solution physique (*Physical solution*).

Des flèches verticales dans la figure 2.5 montrent la correspondance des étapes du processus générique de conception et de développement de produit avec ce modèle d'évolution du produit à 4 états *Needs, Requirements, Logical solution, Physical solution (NRLP)*.

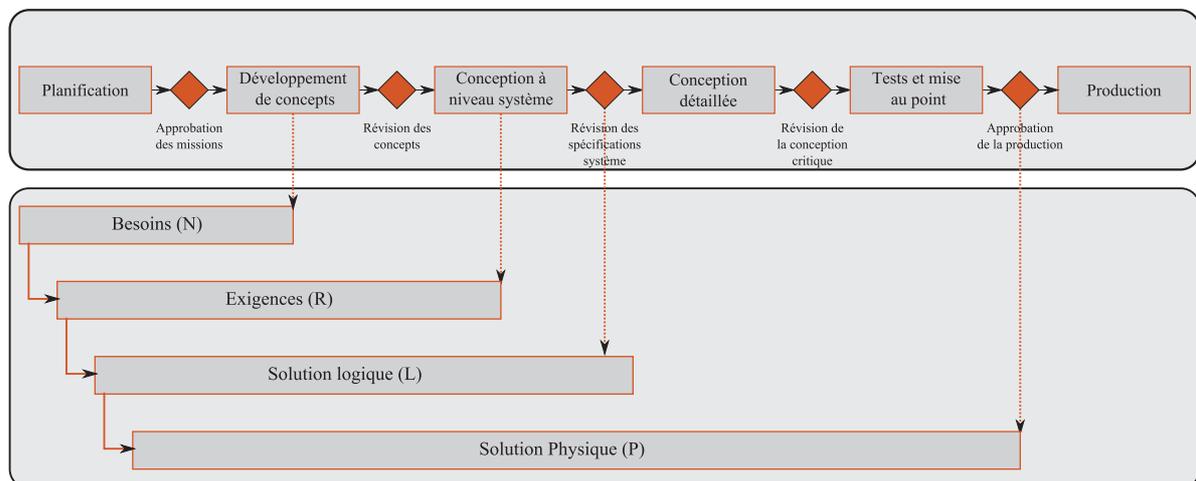


FIGURE 2.5 – Modèle NRLP d'évolution du produit [ZHANG, 2013]

Dans ce modèle d'évolution du produit, le produit est initialement défini par un ensemble de besoins exprimés selon les attentes et fonctions désirées ou exprimées par le client. Ensuite, ces besoins sont transformés en exigences en considérant également d'autres exigences techniques (issues de réglementations ou de normes, par exemple) indispensables pour la conception. La solution logique permet de définir le comportement et la structure du produit. Enfin la solution physique contient la définition des composants physiques du produit et les tolérances des paramètres concernés sont identifiées et affectées.

2.2.3 Conception et complexité des systèmes

Le processus de développement produit présenté dans la Figure 2.5 est générique pour la majorité des produits, mais peut être adapté selon les spécificités du produit étudié. Par exemple, les logiciels informatiques et certains produits électroniques présentent une conception de prototypage dont les phases de construction et de test sont rapides, mais qui doivent être répétées plusieurs fois.

Le processus peut être modifié et devenir itératif [ULRICH et EPPINGER, 2003], voir Figure 2.5. Plusieurs cycles de conception – construction – test peuvent être nécessaires avant de pouvoir lancer la production.

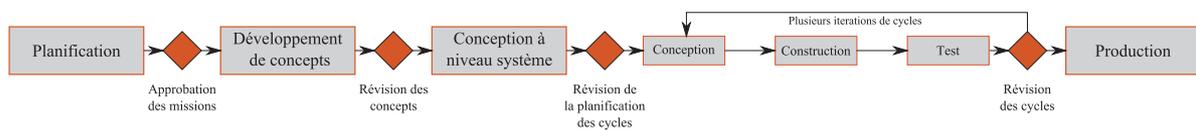


FIGURE 2.6 – Processus itératif de développement produit [ULRICH et EPPINGER, 2003]

Dans le cas où le produit à concevoir présente une complexité, ULRICH et EPPINGER [2003] proposent un processus de développement différent adapté aux systèmes complexes. Un système est dit complexe, selon le Réseau National des Systèmes Complexes, si "c'est un système composé d'un grand nombre d'entités hétérogènes, parmi lesquelles les interactions locales créent plusieurs niveaux de structure collective et d'organisation". Les produits à grande échelle tels que les automobiles et les avions sont considérés comme des systèmes complexes composés de nombreux sous-systèmes et composants interdépendants. Dans le processus de développement correspondant (voir Figure 2.6), et durant la phase de conception à niveau système, la décomposition du produit se fait sous forme de sous-systèmes et puis de composants. Les deux étapes de conception détaillée et de tests et mise au point, sont modifiées. La répartition des équipes de conception se fera dans ce cas en parallèle avec la spécialisation de chaque équipe à un objectif de développement d'un composant ou sous-système donné. Ensuite, une étape d'intégration et tests est réalisée pour coordonner les équipes et avoir une validation globale.

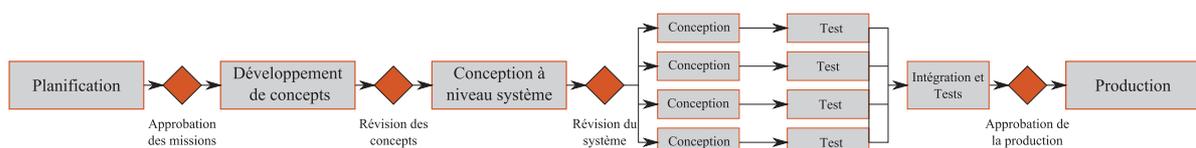


FIGURE 2.7 – Processus de développement pour les systèmes complexes [ULRICH et EPPINGER, 2003]

La norme [ANSI/EIA-632, 1999, 55 :62] définit une décomposition des systèmes de sous-systèmes avec une schématisation hiérarchique en couches de blocs. Cette même norme [ANSI/EIA-632, 1999, 55 :62] met aussi en place un processus appelé cycle de vie technique "*Engineering Life-Cycle*" qui s'applique non seulement dans la phase de développement des concepts mais aussi au cours de n'importe quelles autres phases du cycle de vie du produit (ou de l'entreprise) lorsque cela est nécessaire à la suite des décisions d'ingénierie ou de ré-ingénierie.

Ce cycle technique commence par (i) la définition préliminaire du système, consistant en la définition de l'ensemble des spécifications initiales du système et l'identification des contraintes, risques et exigences technologiques. Il continue (ii) par la construction et définition du système, la décomposition en sous-systèmes et la conception détaillée. Le cycle se termine par une phase (iii) de réalisation présentant une intégration physique de produit final, des tests et une évaluation finale.

2.2.4 La modélisation des produits industriels

2.2.4.1 Définition d'un modèle

En général, un modèle peut être défini soit sous forme de maquette physique, soit sous forme d'objets abstraits (utilisant classiquement les mathématiques). Ce modèle représente les caractéristiques des objets appartenant au produit modélisé et peut aussi donner naissance à un prototype informatique incluant un ensemble de relations et propriétés [GARDAN, 2002].

2.2.4.2 Modélisation d'un produit

Les modèles peuvent avoir des modes de représentation de nature différente. On retrouve dans [CHARPENTIER, 2014] les modèles physiques, géométriques, idéalisés, analogiques, phénoménologiques et des modèles de données.

Les modèles sont considérés comme des supports pour refléter la réalité. Classiquement, dans les travaux de recherche, les études se font généralement sur les modèles plutôt que sur les systèmes réels. Par exemple, pour étudier le comportement mécanique d'un système, on peut faire appel à son modèle sous forme d'ensemble de composants mécaniques et de liaisons mécaniques. La pertinence de l'activité de modélisation repose sur deux points précis : la construction et l'utilisation du modèle [MORGAN, 1999]. Dans certains cas où la modélisation se fait mathématiquement, la résolution des équations d'un problème bien défini s'effectue de façon analytique. Mais souvent, la résolution est difficile voire impossible à effectuer, on recourt donc à des outils informatiques permettant de résoudre l'ensemble d'équations.

Durant le cycle de vie d'un produit industriel, la modélisation peut avoir lieu dans plusieurs situations. Dans une étape préliminaire de la conception, les concepteurs sont amenés à dessiner des modèles en squelettes et des représentations intermédiaires (généralement des esquisses ou des croquis à la main) afin de concrétiser de manière simple les solutions de conception et réaliser plus tard des études de base (de faisabilité, par exemple). Dans la phase de test et évaluation, une succession de modèles est proposée afin de choisir la solution physique optimale du produit. En fin de cycle de vie (maturité), lorsque des demandes de changements sont reçues alors que le produit est déjà fabriqué, le produit peut être modélisé de nouveau si le modèle réalisé précédemment est inexistant ou incomplet.

2.2.4.3 Modélisation géométrique des produits

Un modèle représente l'ensemble des caractéristiques des éléments appartenant au système à modéliser. Si on considère les caractéristiques géométriques du produit, on parle dans ce cas de modélisation géométrique [KATAYA, 2002].

La modélisation géométrique des systèmes au travers d'outil de [Conception Assistée par Ordinateur \(CAO\)](#) est considérée aujourd'hui comme un usage courant dans les phases de conception et de re-conception des produits industriels avant d'aboutir à la fabrication (voir l'annexe B.1 pour plus de détails). Ces modèles géométriques peuvent être bidimensionnels ([Two-Dimensional \(2D\)](#)) ou tridimensionnels ([Three-Dimensional \(3D\)](#)). Les modèles à deux dimensions contiennent une connaissance géométrique du produit limité à l'une de ses vues planes. Durant la conception, ils sont indispensables et utilisés pour réaliser des dessins industriels avant de construire des objets à 3 dimensions. Comme son nom l'indique, le modèle 3D contient les trois plans ou facettes du produit modélisé dans un même modèle.

Quel que soit le type de modèle géométrique, il présente les relations de dépendances géométriques entre ses différents éléments. Chacun de ces modèles peut être utilisé lors du développement du produit tout dépendant de la typologie de conception et de la spécification de l'étude à réaliser.

2.2.5 Typologie de la conception

Les démarches de conception des produits sont généralement classées dans la littérature sous deux types, même si plusieurs appellations/définitions diverses existent. Par exemple, DEMOLY [2010] parle de : (i) la conception nouvelle ou générative pour concevoir et inventer un produit pour la première fois sans qu'il existe des expériences passées en intégrant l'innovation et la créativité, et (ii) la conception prédéfinie ou variationnelle qui intègre la conception routinière et la re-conception d'un produit dont des produits concurrents existent déjà.

Les deux termes les plus utilisés dans la littérature pour ces deux types de conception sont : la conception initiale et la re-conception. Ces deux termes seront utilisés tout au long de ce rapport.

2.2.5.1 La conception initiale

La conception initiale consiste à créer (avec réalisation) et/ou concevoir (sans réalisation) un nouveau produit (ou processus) sans avoir aucune connaissance initiale ni retour d'expérience.

Nous distinguons deux types de conception initiale : une conception créative dans le cas où aucun principe physique existant ne peut expliquer le fonctionnement du produit à concevoir (exemple : machine à transformer le plomb en or, *etc.*) [DIETER, 2000] et une conception innovante présentant des principes physiques connus mis en commun pour la première fois au sein d'une même architecture produit pour pouvoir générer un nouveau produit ou à partir d'une utilisation nouvelle d'une technologie de solution existante (*e.g.* : la conversion des circuits analogues en circuits digitaux équivalents dans le domaine d'électroniques, *etc.*) [CULVERHOUSE, 1995]. La conception initiale exige habituellement plein de recherche, connaissances, compétences et de créativité [PAHL et BEITZ, 2007].

2.2.5.2 La re-conception

La re-conception consiste à changer et améliorer une architecture produit déjà existante dans le but d'optimiser sa performance (par exemple les coûts ou les temps de fabrication). Ce produit reconçu possède probablement une concurrence et un retour sur expériences sur le marché. Le smartphone de marque iPhone est un bon exemple de re-conception, puisque d'une année à une autre l'entreprise américaine Apple produit une nouvelle version du téléphone portable avec une amélioration au niveau de ses performances (autonomie de la batterie, résolution de l'écran tactile, *etc.*)

[BLUNTZER, 2009] classe la re-conception en deux types en s'appuyant sur la connaissance de la nouvelle architecture et de la configuration du produit. Si l'architecture du futur produit est connue initialement et la configuration des différents éléments entre eux est inconnue, nous parlons de conception routinière. Lorsque les deux sont connus d'avance, il s'agit de la conception paramétrique, où il va s'agir de redimensionner les paramètres. D'autres termes existent aussi pour désigner ces deux types de re-conception; certains auteurs comme OTTO et WOOD [2001] parlent de conception variante et de conception adaptative.

Dans la pratique, il est parfois difficile de décider de quel type de conception il s'agit [JARRATT et al., 2004]. De plus, on peut avoir une conception routinière d'un produit alors que la conception d'une de ses parties est considérée comme étant une conception innovante. Par exemple, la conception d'un nouvel avion en connaissant les lois de la physique correspondantes est considérée comme étant une conception routinière puisqu'on ne connaît d'avance que son architecture. Par contre, l'invention d'un turboréacteur innovant avec une nouvelle technologie peut être vue comme une conception innovante.

La re-conception d'un produit apporte un ensemble de changements appliqués à son modèle dans son état existant en changeant l'un de ses composants (sa structure) et/ou ses fonctions. Selon [OTTO et WOOD, 1998], les concepteurs doivent penser à deux niveaux de changements lors de la re-conception du produit. Un premier niveau comprend des changements adaptatifs (paramétriques) et mineurs sur les matériaux et la géométrie, par exemple, de ses composants. Ces changements mineurs représentent une réponse directe et précise aux besoins et attentes des clients [ASHLEY, 1994]. Le deuxième niveau englobe en revanche l'application de changements majeurs sur le produit et ses fonctions de services. Une certaine discontinuité (un saut de la conception du produit d'un palier à un autre) existe dans le cas d'intégration de nouvelles technologies, de nouveaux procédés de production ou d'un changement important dans l'architecture ou la structure du produit.

2.2.6 Prise en compte des changements dans l'ingénierie système et les outils PLM

L'ensemble des activités qui assurent la gestion et le suivi (l'historique de la trace) des documents de spécifications (géométriques, techniques et fonctionnelles) d'un produit et de ses processus tout au long de son cycle de vie est appelé gestion des configurations [XU et NEE, 2009].

Suite aux différents changements exprimés par les clients, les industriels suivent un processus de gestion de ces changements d'ingénierie. Ce processus est spécifié dans les normes internationales comme la norme de gestion des configurations [ANSI/EIA-649, 1998]. Cette norme indique que lorsque les principes de gestion de configuration sont appliqués en utilisant des pratiques efficaces, le retour sur investissement est maximisé et les coûts du cycle de vie du produit sont réduits.

Durant les étapes de ce processus, les industriels utilisent généralement les outils d'ingénierie système et de *product lifecycle management* (PLM) existants.

Le PLM fournit une plate-forme partagée pour capturer, représenter et échanger de l'information entre les différentes parties prenantes à tous les stades du cycle de vie du produit. Le PLM offre un environnement informatique pour gérer le cycle de vie du produit et les différents changements appliqués au produit, à ses documents techniques ou à ses modèles, en veillant à ce que les bonnes informations soient disponibles au bon moment dans le bon contexte tout au long du cycle de vie.

Les outils de *Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur* (CFAO) sont considérés comme étant des outils d'une démarche PLM permettant de réaliser des changements. Les acteurs historiques de la CAO (comme Dassault Systèmes) font maintenant partie des principaux éditeurs PLM (*Computer-Aided Three-Dimensional Interactive Application* (CATIA) par exemple).

Contrairement à la CAO qui ne comprend que des logiciels et des techniques de modélisation de type géométrique, l'ingénierie système est une approche interdisciplinaire regroupant des technologies dans des domaines différents (comme la mécanique, l'électrique, logiciels, etc.) [MESSAADIA, 2008]. Dans les outils de l'ingénierie système, par exemple les diagrammes *Unified Modeling Language* (UML) et *Systems Modeling Language* (SysML), la simple dépendance (représentant un changement) se modélise par un arc entre deux composants différents [COX et al., 2001]. Les diagrammes UML et SysML peuvent être considérés comme des notations pertinentes et efficaces permettant la modélisation, la spécification et la mise en œuvre du système PDM en ce qui concerne la structure du produit et le flux de travail [EYNARD et al., 2006].

En général, le processus de gestion des changements dans l'ingénierie système est un processus qui recouvre les étapes de demande, de détermination de l'accessibilité, de la planification, de la mise en œuvre et de l'évaluation des changements apportés à un système [TURKI, 2008]. Ses principaux objectifs sont de soutenir le traitement et la traçabilité

des changements à un ensemble inter-connecté de facteurs.

Dans cette première partie, nous avons présenté les notions et travaux relatifs au contexte général du sujet de thèse en commençant par la présentation des différentes phases du cycle de vie des points de vue technique et commercial. Le processus générique de conception et développement des produits est ensuite introduit, ainsi que le processus spécifique aux systèmes complexes. D'autres notions telles que la complexité d'un produit ou encore les différentes typologies de conception sont également présentées. Vu l'ambiguïté qu'il peut exister au niveau des définitions et termes utilisés dans la littérature, nous avons présenté dans cette partie les termes, notions et définitions qui seront indispensables aux lecteurs pour la compréhension de la suite du rapport.

La norme [ANSI/EIA-649 \[1998\]](#) propose un processus générique de gestion des changements d'ingénierie, utilisé pour tout changement interne appliqué sur le produit et/ou toute modification apportée au produit sous le contrôle de configuration par des consommateurs, comportant les trois étapes suivantes :

1. **L'identification du changement** : fournir une description du changement demandé et de son impact satisfaisant pour l'évaluation, définir le niveau d'approbation et choisir le format approprié pour la description du changement.
2. **L'évaluation et la coordination** : déterminer tous les effets potentiels des changements et coordonner les impacts potentiels avec les parties impactées.
3. **L'implémentation et la vérification** : implémenter les changements approuvés et vérifier la consistance de l'implémentation avec les documents et les supports (*e.g.* les modèles) du produit.

L'étape 2 d'évaluation et de coordination se compose à son tour de quatre sous étapes : (i) l'évaluation de l'impact du changement, (ii) la détermination de l'effectivité, (iii) la détermination du prix ou du coût et (iv) autorisation d'approbation.

Dans cette thèse, nous nous concentrons sur l'évaluation de l'impact des changements, *i.e.* à la première sous étape (i). Cette évaluation permet la quantification de l'effet du changement pour estimation ultérieure de son coût. Ceci nécessite l'utilisation des outils de support (outils [PLM](#), logiciels de [CAO](#), *etc.*) et des outils d'évaluation ([Change Prediction Method \(CPM\)](#), [Design Structure Matrix \(DSM\)](#), *etc.*) Le domaine de recherche de gestion de changements d'ingénierie présente des méthodes d'[ECM](#) utilisant ses outils et permettant l'évaluation. Dans la partie B, nous présentons et classifions ces différentes méthodologies.

2.3 Gestion des changements d'ingénierie (ECM)

Cette deuxième partie du chapitre 2 vise à présenter les problématiques de gestion des changements d'ingénierie. Nous commençons par définir la notion d'un changement d'ingénierie et présentons les méthodes et approches, issues de la littérature en ingénierie des changements, pour caractériser et visualiser les dépendances entre les paramètres du système et propager les changements. Ces différents travaux sont enfin récapitulés dans une proposition de classification.

2.3.1 L'ingénierie du changement

2.3.1.1 Définition de la notion Changement

Avant d'étudier le domaine d'ingénierie des changements, il s'avère nécessaire de définir tout d'abord le concept de changement d'ingénierie.

En parcourant les travaux de recherche sur l'ingénierie de changements, les changements d'ingénierie ou **Engineering Change (EC)** en anglais, ont été définis dans la littérature de différentes façons en utilisant des termes distincts. Certains chercheurs [HAN et al., 2012] emploient le terme d'ordre de changement "*Change Order*", d'autres, tels que [OLLINGER et STAHOVICH, 2004], se servent plutôt du terme de changement de design "*Design change*", ou utilisent le terme "*Engineering design change*" comme [LEECH et TURNER, 1985]. D'autres termes existent également comme changement de produit "*Product change*" utilisé par [INNESS, 1994; ULRICH, 1995] ou simplement "*Change*" utilisé par [FRICKE et al., 2000]. Mais la plupart utilisent les termes de changement d'ingénierie ou "*Engineering Change*" (EC). Bien que les termes soient différents, ils décrivent la même notion. C'est pourquoi la notation EC sera utilisée tout au long de ce rapport.

Une première définition est donnée par WRIGHT [1997] comme une modification à un composant d'un produit, une fois que le produit est entré en phase de production.

HUANG et MAK [1999] généralisent cette définition et considèrent les phases de conception et de développement du cycle de vie du produit. Les changements d'ingénierie sont définis comme étant les changements et les modifications de formes, de fonctions et de matériaux d'un produit ou de l'un de ses composants.

D'autres auteurs (par exemple [TERWIESCH et LOCH, 1999]) pensent que le temps d'occurrence du changement peut influencer sur son impact et définissent les ECs comme étant des changements de pièces, dessins ou logiciels qui ont déjà été livrés.

Une définition plus générale est proposée par JARRATT et al. [2003] : "*Un changement d'ingénierie est une modification apportée aux pièces, dessins ou logiciels qui ont déjà été libérés au cours du processus de conception de produit. Le changement peut avoir une taille ou un type; le changement peut impliquer n'importe quel nombre de personnes et durer un certain temps*". L'idée principale de ces différentes définitions réside dans le fait qu'un changement d'ingénierie est une modification volontaire d'un paramètre d'un produit lors des phases de conception ou de re-conception.

Comme chaque produit suit un cycle de vie, un changement d'ingénierie à son tour possède un cycle de vie appelé processus de gestion des changements d'ingénierie. Dans la section suivante, nous allons parcourir ce processus de gestion des changements d'ingénierie.

2.3.1.2 Processus de l'ECM

Différentes propositions de processus de gestion de changements d'ingénierie ont été faites en le divisant en différents nombres de phases. DALE [1982] propose un processus formel à deux phases ((1) procédure avant l'approbation des Changements d'ingénierie (2) procédure après), alors que MAULL et al. [1992] a proposé un processus composé de cinq étapes : (1) Filtrer les propositions, (2) Enquêter sur la conception, (3) Évaluer la conception, (4) Autoriser le changement, (5) Exécuter le changement. Un autre processus en six étapes a été suggéré par JARRATT et al. [2004, 2011].

Comme ce dernier processus formel de changements d'ingénierie est le type le plus commun utilisé dans la littérature [ZHANG, 2013], celui-ci est présenté (illustré dans la Figure 2.8) et décrit dans la suite.

Le processus se compose de trois intervalles : avant, durant et après approbation. Des points d'arrêt "breakpoints", comme illustré dans la Figure 2.8, symbolisent les quatre points du processus où le changement peut être résilié ou arrêté. Les deux plus importantes itérations, selon JARRATT et al. [2003], sont marquées par des flèches dans la Figure 2.8. Cependant, les auteurs ajoutent qu'il peut y avoir d'autres itérations tout au long du processus d'ECM.

Le processus de gestion des changements d'ingénierie commence toujours par une demande de changements, suite à un déclencheur de changement "*Change Trigger*" qui

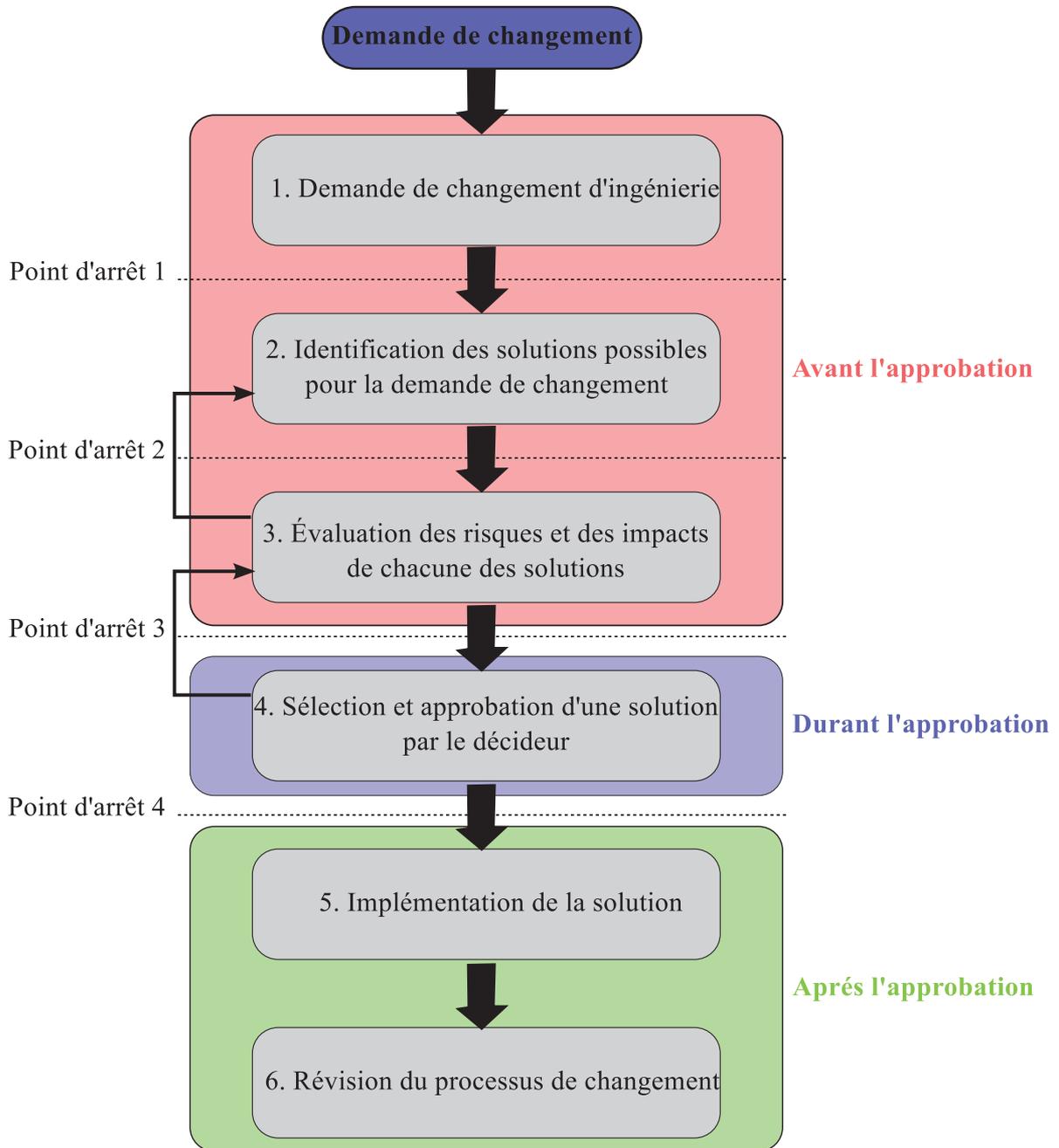


FIGURE 2.8 – Processus de l'ingénierie du changement selon JARRATT et al. [2004, 2011]

peut être émis soit par les clients, les fournisseurs ou même des sources internes (concepteurs par exemple) afin de corriger les erreurs ou améliorer le produit de diverses manières [WATTS, 1984].

Cette demande de changements inclut les informations concernant le type, le motif et la priorité du changement, *etc.* La tâche principale de l'étape 2 du processus, est de trouver les différentes solutions au problème de changement, les évaluer et les transformer par la suite en propositions de changements [TAVČAR et DUHOVNIK, 2005]. Cependant, une seule solution est souvent étudiée en raison des restrictions de temps [JARRATT et al., 2011]. Le risque et/ou l'impact de chacune de ces propositions de changements est évaluée à l'étape 3. Dans la quatrième étape, la solution qui répond au mieux à la demande de changements est sélectionnée et approuvée. Une fois sélectionnée, cette solution doit être implémentée et exécutée tout en tenant compte des contraintes (de coût, par exemple). La dernière étape a pour but d'évaluer si le changement mis en œuvre a entraîné des résultats bénéfiques. Dans cette thèse, nous nous concentrons sur la troisième étape du processus d'ingénierie du changement pour évaluer l'impact des changements en utilisant les outils de l'ECM (comme les graphes de dépendances et les DSM).

2.3.2 Les méthodes de propagation des changements

2.3.2.1 Caractérisation des changements

L'évaluation d'impact de la propagation de changement ne devient possible qu'après la caractérisation des changements, quantitativement et qualitativement. La caractérisation qualitative signifie donner un aperçu des variations possibles d'un paramètre sans chercher à déterminer leurs valeurs. La caractérisation qualitative a été présentée par [KUSIAK et WANG, 1995] par la détermination du "sens" du changement (croissante, décroissante, null ou inconnue) d'une variable affectée par une autre. La même idée a été utilisée par [CHUA et HOSSAIN, 2012; COHEN et al., 2000] qui ont ajouté des valeurs qualitatives (faible "L-Low", moyenne "M-Medium" et élevé "H-High") issus d'une expertise empirique.

Concernant les méthodes utilisant la dépendance quantitative, elles visent à déterminer les nouvelles valeurs des variables générées par l'apparition d'un changement. [CHENG et CHU, 2012] et [KUSIAK et WANG, 1995] utilisent la dépendance quantitative permettant de calculer le taux de changement.

[CLARKSON et al., 2004] et [HAMRAZ et al., 2013a] ont utilisé des variables aléatoires, appelées "likelihood", pour modéliser la probabilité d'occurrence des changements. Ils ont également ajouté les valeurs déterministes des impacts pour intégrer un changement dans le nœud cible, voir [HAMRAZ et al., 2013a; KELLER et al., 2005; KIM et al., 2013; RUTKA et al., 2006].

HAMRAZ et al. [2013b] a montré les limites de cette approche en deux points : (i) le modèle utilisé est totalement subjectif, et (ii) la méthode définie par CLARKSON et al. [2004] fournit un modèle statique dans lequel les impacts des changements sont capturés une seule fois et les prédictions ne sont pas mises à jour lors de la propagation.

2.3.2.2 Modélisation des dépendances

Les dépendances expriment si un changement de la valeur d'un élément peut générer des changements sur les valeurs des autres paramètres [COX et al., 2001]. Elles peuvent être définies ou identifiées à l'aide de modèles théoriques qui contiennent des liens reliant des paramètres et des variables.

Dans ce rapport, une dépendance entre deux paramètres d'un produit est définie comme *l'effet direct du changement de la valeur d'un paramètre sur un autre* comme proposé dans [ZHANG, 2013].

Un modèle théorique peut faire appel à plusieurs domaines d'expertise (mécanique, thermique, électronique, *etc.*). Tous ces connaissances, ensemble, permettent de déterminer clairement les comportements et la structure du système, voir [RAFIC, 1993].

Dans de tels modèles, chaque dépendance est définie qualitativement, quantitativement, ou bien par des équations. Néanmoins, le modèle théorique peut être, dans certains cas, indisponible ou incomplet, surtout pour des systèmes et des produits très âgés ou en phase de maturité (voir l'exemple des systèmes hérités dans [BKCASE, 2016]). Dans ce cas, des modèles, appelés dans ce rapport *modèles a posteriori*, sont construits par les nouveaux concepteurs en se basant sur l'analyse du système existant. On peut utiliser, par exemple, des expériences (changer la valeur d'un paramètre physique et mesurer les nouvelles valeurs des autres paramètres du système par des outils de mesure) ou des simulations (changer la valeur d'un paramètre dans un modèle et mesurer les nouvelles valeurs des autres paramètres à l'aide d'un logiciel de simulation sans réaliser l'expérience) pour obtenir de tels modèles. L'étude de la propagation peut être ensuite effectuée sur ces modèles obtenus. Dans la suite, sont présentés deux types d'outils utilisés dans les travaux de gestion de changements d'ingénierie pour modéliser les dépendances.

2.3.2.2.1 Les matrices DSM, DMM La matrice de structure de conception ("*Design Structure Matrix*" ou **DSM**) est une matrice carrée avec des étiquettes identiques sur les lignes et les colonnes correspondant aux éléments du système [EPPINGER et BROWNING, 2012]. Une **DSM** aide à identifier les pièces d'un produit ou les tâches de conception d'une part et les relations paramétriques ou de précédence entre eux d'autres part [EPPINGER et al., 1994]. La Figure 2.9 illustre un modèle simple de **DSM** appelée "DSM binaire".

	1	2	3	4	5	6
1	1	*			*	*
2		2				
3			3	*		*
4	*			4		
5					5	
6		*				6

FIGURE 2.9 – Exemple de DSM avec six éléments

[EPPINGER et BROWNING, 2012] ont proposé deux notations pour deux différentes conventions : **Inputs in Row/Feedback Above the Diagonal (IR/FAD)** et **Inputs in Columns/Feedback Below the Diagonal (IC/FBD)** selon le sens de lecture d'une **DSM**.

- Convention de **IR/FAD** : **DSM** avec des entrées indiquées dans les lignes, sorties en colonnes;
- Convention de **IC/FBD** : **DSM** avec des entrées indiquées dans les colonnes, sorties en lignes.

Pour la première convention, ce que l'on va utiliser tout au long du rapport, les entrées sont présentées en lignes et les sorties en colonnes.

Dans la **DSM** de la Figure 2.9, modélisée pour le cas d'un système à six éléments, chaque cellule (sur la ligne i et la colonne j) indique la présence ou l'absence d'une interaction ou dépendance entre les éléments i et j dans un sens spécifique. A la lecture de la ligne 3, l'élément 3 est en liaison avec les éléments 4 et 6 (l'existence d'une dépendance est notée par une étoile). L'élément correspondant à la colonne 6 est lié avec les éléments 1 et 3.

La représentation binaire de la **DSM** peut être étendue de plusieurs façons, en incluant d'autres types d'attributs pour caractériser les interactions. Ces étiquettes peuvent conte-

nir, par exemple, le nombre d'interactions, l'importance, l'impact ou la force des dépendances.

Dans notre approche, nous allons utiliser diverses techniques de type **DSM** et leurs graphes associés pour représenter les dépendances et leurs différents attributs. Pour plus d'information sur les **DSMs** et leurs différentes extensions, le lecteur est invité à consulter les travaux de [BROWNING, 2001], [KARNIEL et REICH, 2009] et [EPPINGER et BROWNING, 2012].

La matrice de mappage de domaine (**Domain Mapping Matrix (DMM)**) est un second type d'approche basée sur la matrice proposée par **DANILOVIC et BROWNING [2007]**. Contrairement aux **DSMs** qui sont des matrices carrées, une matrice **DMM** possède une forme rectangulaire de taille $(n \times m)$, relative à deux **DSMs** représentant deux différents domaines, où n et m sont les tailles de la **DSM** de chaque domaine du projet. **DANILOVIC et BROWNING [2007]** donnent une comparaison des approches traditionnelles de **DSM** et **DMM**, puis présentent les principaux avantages de l'utilisation de chaque outil dans des projets de développement de produit. Ils concluent que l'utilisation conjointe de **DSMs** et **DMMs** peut enrichir la compréhension de la complexité du système, réduire l'incertitude et accroître les connaissances pour l'analyse des dépendances entre les éléments du système.

2.3.2.2.2 Les graphes de dépendance La théorie des graphes a été utilisée depuis des décennies dans plusieurs domaines tels que la recherche opérationnelle (problèmes de plus courts chemins, problèmes de flots maximum, voir [GONDRAN et MINOUX, 1984] pour plus de détails) ou encore l'étude des réseaux sociaux, et repose sur des théories à la frontière entre les mathématiques et l'informatique. Mais, elle a été utilisée aussi dans le domaine de gestion des changements d'ingénierie.

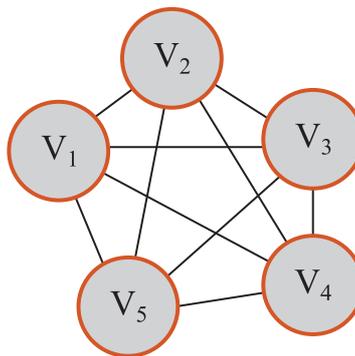


FIGURE 2.10 – Exemple d'un graphe d'ordre 5 et de taille 15

Un graphe $G = (V, E, \Psi)$ est un ensemble V de points appelés nœuds ou sommets reliés entre eux par un deuxième ensemble E de segments (avec ou sans flèches) nommés arêtes, liens ou arcs. Le graphe est accompagné aussi d'une fonction d'incidence Ψ qui associe à chaque arête de G une paire de sommets de G . Les nombres de sommets et d'arêtes de G sont appelés l'ordre et la taille de G , respectivement [BONDY et MURTY, 1976].

Dans le domaine de la gestion des changements d'ingénierie, la théorie est employée pour modéliser et visualiser les dépendances entre les éléments d'un système. Ce graphe est souvent appelé "Graphe de dépendance" et parfois le terme "Réseau de dépendance" est utilisé. Les matrices, **DSMs** ou **DMMs**, peuvent être considérées équivalentes à un graphe de dépendance et contiennent les mêmes données (valeurs de dépendances). En effet, une matrice d'adjacence d'un graphe (avec laquelle on construit un graphe orienté) correspond à la même définition qu'une **DSM**. C'est pourquoi, on retrouve l'utilisation de ces deux types de structure de données (matrices et graphe de dépendance) dans les méthodes d'**ECM**.

2.3.2.3 Propagation du changement

Plusieurs méthodes, approches et outils ont été développés dans le domaine d'ECM. La plupart des méthodes incluent un modèle et une technique pour prévoir et/ou analyser l'impact de la propagation de changements au sein d'un produit [HAMRAZ et al., 2013a]. Le produit peut être modélisé en plusieurs couches (fonction, structure, forme, etc.) et le changement initial est exprimé relativement à l'une de ces couches. Les méthodes de références se concentrent principalement sur une seule couche du produit comme la couche structurelle, c'est-à-dire, en étudiant uniquement les changements sur les composants du produit. Ces méthodes sont présentées ci-après et incluent la méthode **Change FAVORABLE Representation (C-FAR)** de COHEN et al. [2000], la méthode de prédiction des changements (CPM) de CLARKSON et al. [2004], la méthode basée sur les réseaux de CHENG et CHU [2012], celle de RUTKA et al. [2006] et finalement la méthode proposée par KUSIAK et WANG [1995].

D'autres méthodes sont considérées comme des extensions de ces méthodes de référence, certaines s'intéressant à la propagation des changements entre différentes couches du système/produit, d'autres concernant la gestion des changements dans le cadre d'un travail collaboratif entre plusieurs entreprises. Elles sont présentées dans la section 2.3.2.3.6 et comprennent les méthodes de FLANAGAN et al. [2003]; HAMRAZ et al. [2012]; ROUIBAHA et CASKEYB [2003].

Huit méthodes ont été sélectionnées pour être présentées en détail dans cette section car elles représentent les méthodes les plus intéressantes et influentes dans le domaine de gestion des changements. Une autre classification des travaux de recherche dans la gestion des changements d'ingénierie est également présentée.

2.3.2.3.1 Méthode de prédiction des changements CPM La méthode de prédiction des changements "*Change Prediction Method (CPM)*" a été proposée par CLARKSON et al. [2004] pour prédire le changement et le caractériser d'une façon numérique et probabiliste. Dans cette méthode les auteurs utilisent un modèle de dépendances liant chaque paire de composants pour calculer et visualiser le risque global de la propagation d'un changement imposé sur un composant et qui affecte d'autres composantes. Le résultat de la méthode CPM est une matrice d'adjacence (appelée aussi une DSM), où les éléments en colonne indiquent les composants instigateurs (qui initient le changement), les éléments en ligne indiquent les composants affectés (qui reçoivent les modifications) et les cellules entre deux composants données incluent les valeurs du risque correspondant.

Au début de cette méthode, le produit est décomposé en sous-systèmes (des composants ou pièces). Le nombre de sous-systèmes dépend du niveau de décomposition choisi. Les auteurs recommandent une décomposition avec moins de cinquante composants. Les dépendances directes entre les composants sont capturées dans une matrice DSM binaire, où une croix "×" indique l'existence d'un lien de dépendance.

Deux autres DSMs, appelées matrices directes de probabilité "*likelihood*" et d'impact sont utilisées. Leurs valeurs sont données par des experts (concepteurs) en se basant sur leur expérience et leurs connaissances du produit. La matrice de probabilité directe représente la fréquence relative de la propagation d'un changement entre deux composantes. La valeur de risque direct est calculée ensuite en multipliant la valeur d'impact avec celle de probabilité. Le risque combiné de la propagation de changement représentant la dépendance indirecte est calculé en utilisant l'algorithme "*Forward CPM*". Cet algorithme considère la propagation des changements se propageant entre n'importe quel couple de composants par l'intermédiaire de plusieurs chemins directs et indirects tout en excluant les auto-dépendances et les chemins cycliques. CLARKSON et al. [2004] utilisent dans leur algorithme les opérateurs d'intersection et d'union le long des chemins de propagation pour calculer les probabilités et impacts. Le risque combiné de propagation de change-

ment regroupe les risques directs et indirects. Comme dit précédemment, le risque direct est défini par le produit de la probabilité directe et de l'impact direct entre deux composants. Par contre, le risque indirect ne considère que le changement (somme de produits de probabilité et d'impact) qui se propage via les composants intermédiaires. La matrice de risque combiné proposée est considérée comme étant un outil d'aide à la décision pour la gestion des changements.

2.3.2.3.2 Méthode Change FAVORABLE Representation C-FAR La méthode "Change Favorable Representation" notée par "C-FAR" a été proposée par COHEN et al. [2000]. Ils utilisent la représentation EXPRESS comportant des entités, des attributs et des relations. Dans cette modélisation, une entité (représentant un composant) est modélisée par un vecteur dont les composantes correspondent aux attributs de l'élément et sont liées entre eux par des relations. De plus, les dépendances entre les attributs de deux entités sont représentées dans une matrice et caractérisées qualitativement en affectant les valeurs "faible", "moyen" et "élevé" en se basant sur l'évaluation des experts du domaine. Par la suite, ces matrices et vecteurs sont multipliées, le long des chemins de propagation du changement (définis par une succession de paramètres dépendant entre eux selon la matrice) pour calculer les valeurs des liaisons entre chaque couple d'attributs.

Cette méthode est surtout appropriée pour les produits de petite taille ou relativement simples. Elle ne peut être utilisée lors d'une analyse exhaustive en raison de l'immense quantité de données requises et des calculs importants (multiplications de vecteurs).

2.3.2.3.3 Approche basée sur les réseaux Une autre méthode, très proche de la méthode CPM, a été proposée par CHENG et CHU [2012]. Cette étude développe une méthode quantitative, basée sur la théorie des réseaux complexes pondérés, pour mesurer les impacts du changement sur l'ensemble du produit en quatre étapes (voir Figure 2.11). Les connexions d'un produit complexe forment une structure de réseau complexe plutôt qu'une structure arborescente (arbre de connexions), appelée réseau du produit "*Product network*".

La construction de ce réseau implique :

- (1) La décomposition du produit en sous-systèmes contenant des composants,
- (2) Le développement des relations de dépendance entre les pièces,
- (3) Le calcul des valeurs pondérées (selon la dépendance entre eux).

Généralement, les mesures de centralité permettent d'identifier le nœud le plus important dans un réseau en se référant aux interactions/liaisons existantes.

Trois indices de "*changeability*", dérivées du domaine de mesure de centralité des réseaux et qui sont classiquement appliqués aux réseaux sociaux, ont été proposés par les auteurs pour l'évaluation d'impact du changement :

- "*Degree-changeability*" pour l'évaluation d'impact direct des changements
- "*Reach-changeability*" pour l'évaluation d'impact indirect des changements
- "*Between-changeability*" pour juger les pièces qui vont être modifiées avec un impact important.

Dans cette méthode, le produit est modélisé par un réseau de dépendances pondéré reliant ses pièces (ou sous-systèmes) en utilisant les degrés de couplage, contrairement à la méthode de CPM, où les relations de dépendance entre ces éléments sont représentées par des valeurs de probabilité et d'impact des changements. Pour des deux méthodes, les valeurs de dépendance sont issues d'interviews des experts du domaine. Au niveau de la propagation des changements, l'algorithme de propagation de CPM considère tous les chemins possibles de changement en pondérant leurs impacts avec les probabilités respectives, par contre les indices de "*changeability*" proposées par CHENG et CHU [2012]

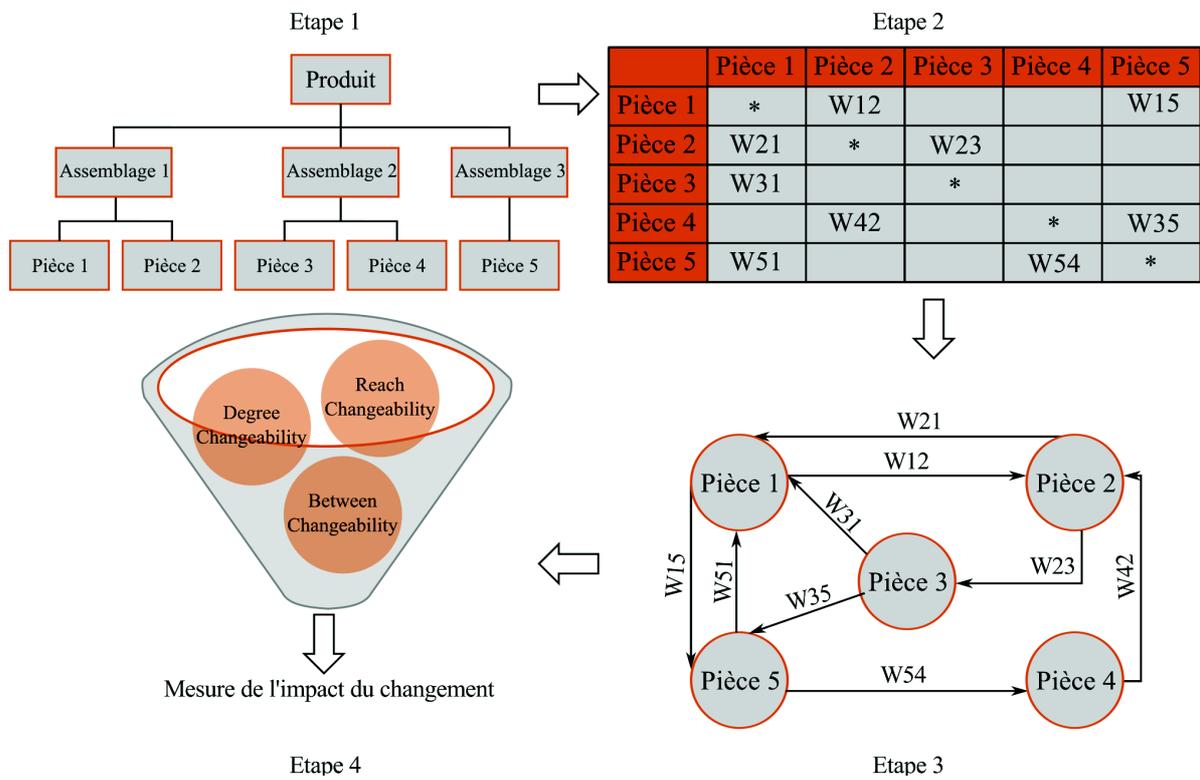


FIGURE 2.11 – Méthode de CHENG et CHU [2012]

considèrent seulement les chemins d'accès avec le maximum d'impact entre les deux composants (nœuds).

2.3.2.3.4 Méthode de Rutka Dans la méthode de propagation des changements proposée par RUTKA et al. [2006], on remplace les valeurs de probabilité et l'impact directs avec des relations dépendantes du type et du degré de changement, voir Figure 2.12.

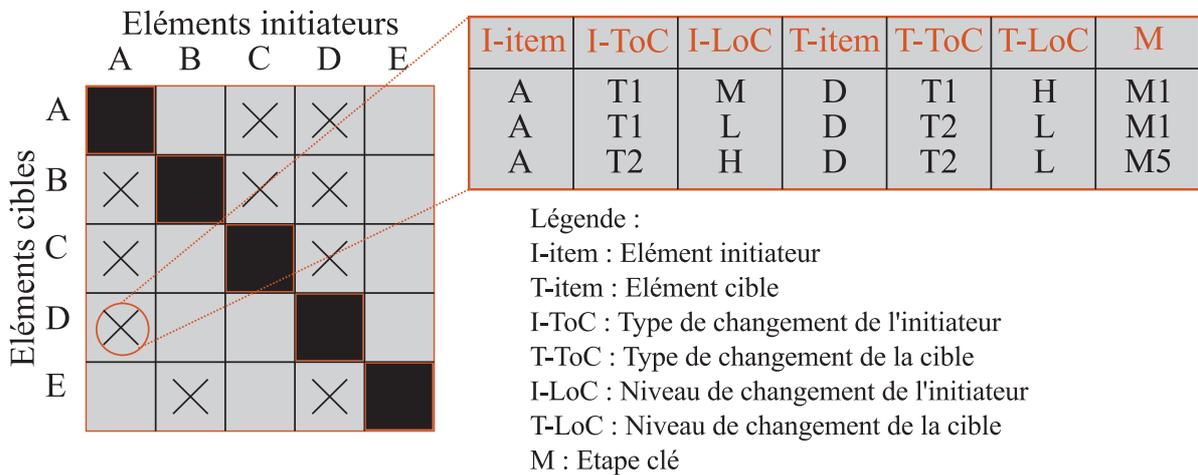


FIGURE 2.12 – Exemple de dépendance [RUTKA et al., 2006]

Le modèle de dépendance proposé peut regrouper des informations associées à plusieurs domaines d'ingénierie système, tels que les activités de conception et architecture des produits. Ce modèle peut contenir également les liens et relations entre deux éléments différents (du même domaine ou non). Chacun de ces éléments est associé à un certain nombre d'attributs descriptifs. Un changement est défini par un type de changement (**Type of Change (ToC)**) et un niveau de changement (**Level of Change (LoC)**) parmi 3 niveaux (faible "L", moyen "M", élevé "H"). Les dépendances entre les éléments, de la source de

changement jusqu'à la cible, sont décrites qualitativement dans une DSM et indiquées plus en détail en définissant le type et le niveau de changement pour chaque élément.

La propagation des changements peut être représentée comme un arbre montrant les étapes de la simulation des changements et les terminaisons possibles. En parcourant l'arbre de propagation, la propagation des changements passe d'un nœud à un autre à travers les dépendances. Elle s'arrête lorsqu'il ne reste pas de dépendances à simuler, ou lorsque la valeur de l'élément doit être gelée (une valeur limite est atteinte). De plus, après un nombre donné d'étapes, la propagation prendra fin. Les cycles ne sont pas pris en compte.

2.3.2.3.5 Méthode de Kusiak Nous considérons aussi [KUSIAK et WANG, 1995] comme étant une méthode de référence, bien que non citée dans le domaine de la gestion des changements d'ingénierie. La méthodologie proposée par KUSIAK et WANG [1995] avait initialement comme objectif d'aider les concepteurs à la négociation des contraintes (définie par la simulation de plusieurs scénarios en variant à chaque fois les valeurs des paramètres d'un système et vérifiant si un système d'équations représentant les contraintes est respecté). Un modèle de réseau de dépendance a été utilisé dans leur approche. Ce réseau est un quatre-tuple $G = (V, E, \Omega, \Psi)$, qui contient :

- Les sommets (V) représentant les variables de conception, les contraintes et les objectifs de conception du système étudié,
- Les arcs (E) correspondant à la relation entre chaque couple de sommets,
- La caractérisation qualitative (Ω) définie par une valeur qualitative (+, -, 0, ?) de la dépendance portée par les arcs,
- La caractérisation quantitative (Ψ) définie par une valeur quantitative de la dépendance portée par les arcs.

Un algorithme de réduction a été élaboré pour représenter et dériver des dépendances (δ_{ij}) entre les variables de décision (x_i) ou de spécifications (représentés par des carrés), et les contraintes (triangles) et objectifs (octogones), comme illustré à la Figure 2.13.

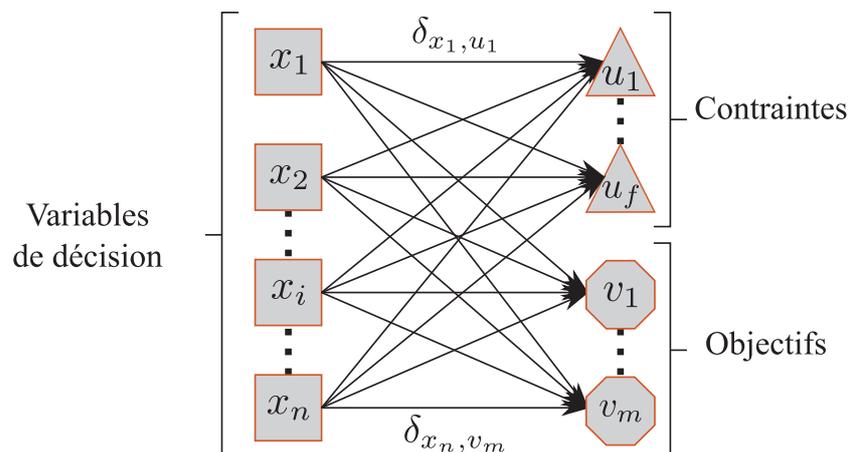


FIGURE 2.13 – Graphe de dépendance réduit [KUSIAK et WANG, 1995]

Dans la deuxième partie de leur proposition, KUSIAK et WANG [1995] proposent une approche basée sur la logique floue pour modéliser les dépendances imprécises entre les variables dans le cas où aucune information quantitative suffisante n'est disponible.

2.3.2.3.6 Extensions des méthodes HAMRAZ et al. [2012] ont présenté un modèle de propagation de changements multi-domaines appelée modèle de liaison **Function, Behavior, Structure (FBS)** visant à améliorer la gestion des changements lors de la conception

en combinant les risques liés aux fonctions, le comportement et la structure du système. Dans ce modèle, les auteurs combinent les concepts de deux approches déjà établies, le modèle FBS de GERO [1990] et l'approche CPM de CLARKSON et al. [2004]. Pour concevoir ce modèle, trois types de connaissances sont requises.

- Des connaissances structurelles qui comprennent la définition des matières utilisées, les formes et les dimensions des pièces, ainsi que tous leurs éléments constitutifs, arrangements et connexions. Une description structurelle suffisante comprend les informations nécessaires sur les paramètres explicites des pièces pour construire son modèle de nouveau.
- Des connaissances comportementales qui comprennent une description des comportements possibles du produit en réponse à son environnement. Le comportement est défini comme une description des processus en réponse aux conditions environnementales ou des actions du produit. Les comportements sont dérivables au moyen d'une théorie physique de la structure du produit et éventuellement certaines propriétés des conditions environnementales. L'état physique des produits peut être décrit par les paramètres et leur transition d'état (ou état statique) par des lois de la physique.
- Des connaissances fonctionnelles décrivant le rôle du produit et ses différentes parties. Les fonctions répondent à la question suivante : "Dans quel but le produit est-il conçu?"

FLANAGAN et al. [2003] ont développé une méthode d'analyse des changements qui détermine comment le changement est susceptible de se propager. Le modèle de propagation de changement utilisé relie les paramètres du produit avec des interactions de forme et fonctionnelles. Les chemins de propagation et les connexions les plus critiques sont illustrés dans une DSM. Cette méthode commence par la décomposition du système en composants et ensuite en fonctions. Donc deux matrices DSM "fonction-fonction" et "composants-composants" doivent être données comme entrée de la méthode. On ajoute à ces deux matrices une troisième DMM "composant-fonction" qui montre les liaisons existantes entre composants et fonctions du système.

De celles-ci, ils génèrent, à l'aide de leur outil, une matrice indiquant quelles paires de composant-fonction (nommées "features") sont connectées ensemble. En réécrivant cette matrice, l'outil peut montrer les chemins de propagation entre ces caractéristiques (fonctions, composants), proposant ainsi un moyen d'analyse pour voir comment se propage le changement au sein du système.

ROUIBAHA et CASKEYB [2003] ont présenté une approche basée sur l'utilisation des paramètres dans le cadre d'un travail collaboratif partageant des informations et des données pour une meilleure gestion des changements. Cette approche concerne la gestion des changements (ECM) et l'ingénierie concurrente lors de la conception d'un produit dans plus d'une entreprise.

Leur approche vise à fournir un aperçu rapide des changements pour prédire leurs impacts. Les paramètres sont très spécifiques au système et ses interfaces qui peuvent être soit des dimensions, des forces, des mouvements et/ou d'autres paramètres de décisions élémentaires. Selon la structure du produit, ces paramètres sont liés aux éléments du produit et à un réseau de personnes. Et à chaque fois que l'état de la valeur d'un paramètre particulier change, les personnes concernées sont prévenues.

2.3.2.4 Visualisation de la propagation

Une méthode d'ECM nécessite une technique de représentation comme support de l'analyse des résultats. Les graphes de dépendance peuvent être utilisés pour montrer les directions de propagation de changement. Une approche intéressante consiste à montrer

les chemins de propagation, commençant par un nœud racine et finissant par des nœuds cibles, voir [KELLER et al., 2005] et [RUTKA et al., 2006]. Un chemin de propagation commence à partir d'un nœud source (ou nœud instigateur) du changement et se termine lorsqu'on atteint un nœud d'arrêt de propagation, dit gelé ("frozen" en anglais), ou si le nombre limite d'étapes de propagation est atteint. Dans certains cas, le nombre de chemins possibles peut être réduit en permettant à l'utilisateur de spécifier des relations de précedence entre les nœuds du graphe [FLANAGAN et al., 2003].

Certains auteurs ont mis l'accent en particulier sur la visualisation de la propagation de modification en utilisant des indicateurs qui caractérisent la propagation. [KIM et al., 2013] a proposé un indice de propagation de changement (**Change Propagation Index (CPI)**) allant de la valeur "-1" à "+1". Cet indice indique la direction de propagation de changement (augmentation ou diminution) et est utilisé pour analyser les composants individuellement, classer leurs comportements et décider quels composants doivent être changés lors de la re-conception du produit. Le comportement d'un composant est ensuite classé selon trois catégories : multiplicateurs, absorbeurs et porteur, comme décrit par [ECKERT et al., 2004], selon sa valeur CPI.

De même, CHENG et CHU [2012] ont développé trois indicateurs d'évaluation basés sur le concept de centralité des réseaux pondérées, présentés dans la section 2.3.2.3.3 : (i) degree-changeability pour évaluer le l'impact direct du changement, (ii) reach-changeability pour mesurer l'impact indirect du changement, et (iii) between-changeability pour définir les parties situées stratégiquement sur les chemins de propagation reliant les autres paires. Ces mesures de centralité peuvent identifier les principaux nœuds du réseau en se basant sur leurs interactions et influences. Enfin, [YANG et DUAN, 2012] ont proposé une indicateur de propagation de changement défini comme la somme des paramètres directs modifiés et des paramètres affectés pour chaque changement spécifique. Ensuite, le chemin de propagation de changement optimal est retrouvé en choisissant la solution associée à la plus petite valeur de l'indicateur.

2.3.2.5 Autres classifications

Les travaux de recherche sur le thème de la gestion des changements d'ingénierie peuvent être classés selon le domaine des changements. Au sein de notre équipe, une analyse détaillée, faite par ZHANG [2013], classe plusieurs travaux de recherche d'ECM, plus spécifiquement, la propagation des changements dans les projets de développement des produits en trois catégories(ou **Produit, Projet, Partenariat (3P)**) : (i) la gestion des connaissances des Produits (ii) la gestion des connaissances des Projets et (iii) la gestion des connaissances des Partenariats. Les résultats de cette classification sont présentés dans la Figure 2.14.

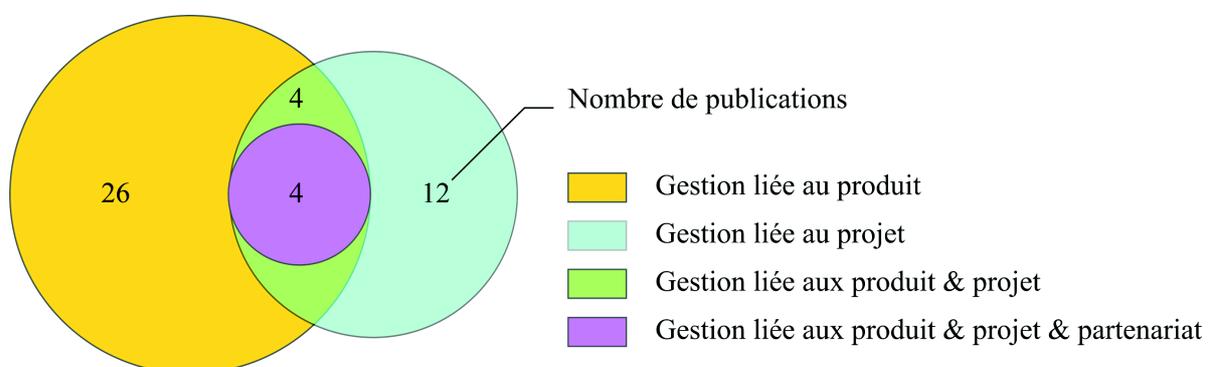


FIGURE 2.14 – Analyse de la littérature selon les 3P [ZHANG, 2013]

Selon cette étude, 56% des travaux se focalisent exclusivement sur le changement dans domaine de connaissance du produit. De plus, quatre papiers regroupent les domaines

de gestion des produits et projets et quatre autres papiers rassemblent les trois domaines liés aux produits, projets et partenariats. Ces statistiques montrent bien l'importance de l'investigation du domaine de gestion des changements relié au produit.

D'autres classifications existent aussi dans la littérature. HEIN [2015] classe les travaux de recherche en gestion des changements d'ingénierie selon le type de changement. Certains travaux comme [GIFFIN et al., 2009] et [COHEN, 1997] considèrent des changements apportés sur les sous-systèmes, d'autres comme [KUSIAK et WANG, 1995; LOCK et al., 1999; MASMOUDI et al., 2015] traitent des changements sur les composants ou paramètres et enfin un dernier groupe [IBRAHIM et al., 2011] et [CHEN et al., 2010] se concentre sur des changements des exigences.

Dans cette partie 2 du chapitre 2, nous avons présenté les méthodes de gestion des changements d'ingénierie. Vu qu'elles sont très variées, nous avons procédé à un classement selon qu'elles soient des méthodes originales ou des extensions des ces premières. Les méthodes considérées comme des références incontournables du domaine de l'ECM sont présentées plus en détail. Une première classification de ces travaux a été proposée en tenant compte des couches du produit considérées. Ces couches peuvent regrouper (i) la couche fonctionnelle, présentant par les fonctions de chaque pièce du produit, (ii) la couche comportementale, décrivant le comportement des pièces après l'occurrence d'un changement donnée et (iii) la couche structurelle qui donne un aperçu des changements appliqués sur la structure du produit en termes de composants.

La majorité des méthodes traitent le produit uniquement selon sa couche structurelle en analysant les changements sur les paramètres de ses composants. Le fait de prendre en compte ces trois couches est difficile à réaliser vu que cela nécessite un grand nombre d'informations et de connaissances. Dans cette thèse, nous proposons une approche prenant en considération uniquement la couche structurelle du produit mais en offrant plus de détails que les travaux présentés précédemment.

2.4 Conclusion de l'état de l'art

2.4.1 Explicitation des connaissances théoriques : Modèle de dépendance théorique

Toutes les méthodes de propagation de changements qui ont été présentées précédemment dans la partie 2 de ce chapitre 2 commencent par la caractérisation de la dépendance entre les éléments d'un système et finissent par analyser le mécanisme de propagation des changements. Ces éléments sont généralement liés par des relations déjà connues, que l'on peut extraire d'un modèle théorique. Ce modèle de dépendance théorique est exprimé grâce à un ensemble d'équations, de relations qualitatives ou même de règles d'influence (du type : si la valeur d'un paramètre x égale à une valeur ou appartient à un intervalle alors un deuxième paramètre vaut une certaine valeur). Les données, et les relations liant ces données peuvent appartenir à plusieurs domaines de connaissance (comme la mécanique et la thermique, *etc.*).

Dans la littérature, on retrouve les travaux de [KUSIAK et WANG, 1995] et [YANG et DUAN, 2012] qui ont utilisé ce genre de modèle de dépendance en se basant sur des équations de lois physiques et des règles d'influence.

Dans ces approches, purement basées sur un modèle théorique, les modèles disponibles sont utilisés pour déterminer les nouvelles valeurs des paramètres (c'est-à-dire, les nœuds du graphe de dépendance) et la direction des variations et changements relatifs.

Les modèles théoriques sont utilisés pour produire des alternatives de conception; une alternative de conception est un modèle de produit qui intègre toutes les modifications requises en tenant compte des contraintes. Les principaux inconvénients de ces modèles

sont les suivants :

- Ils nécessitent beaucoup de connaissances et d'expertise provenant de différents domaines (mécanique, électronique, *etc.*) afin de construire des modèles théoriques pertinents. Dans le cas où ces modèles n'existent pas, leur identification consomme extrêmement de temps et d'effort.
- Puisque ces modèles sont à grain fin (très détaillés) :
 - La propagation des changements est effectuée sur tous les paramètres du système (*cf.* [KUSIAK et WANG, 1995]). Cela permet de générer plusieurs alternatives de conception détaillées qui nécessitent un temps de calcul trop long. Ce niveau avancé de détails peut être considéré, pour certains paramètres, comme inutile ou non nécessaire (sans valeur ajoutée pour certaines études)
 - Des techniques spécifiques sont utilisées pour regrouper et agréger les modèles multidisciplinaires détaillés en des modèles plus simples. Cependant, cette tâche n'est pas facile à faire (par exemple, il est difficile de combiner l'effet du poids d'une bicyclette sur sa dynamique, voir [WILSON et PAPADOPOULOS, 2004]).

Ces méthodes sont incontestablement utilisées pour la conception détaillée, mais ne sont pas pertinentes pour la propagation de changements à partir de données moins détaillées.

Par ailleurs, notre thèse se positionne dans la phase de conception niveau système (troisième phase du processus de conception et développement produit présenté dans la Figure 2.4) où nous cherchons à éclairer les concepteurs sur leurs grandes lignes de choix (à un niveau stratégique de choix). Il est ainsi possible d'éliminer certaines alternatives de l'espace de solution rapidement et par conséquent économiser la dépense d'énergie dans l'étude détaillée de ces alternatives non pertinentes dans la phase ultérieure de la conception détaillée. Nous nous concentrons donc sur ces grandes tendances pour pouvoir par la suite peaufiner seules les solutions les moins impactantes en termes de propagation.

2.4.2 Techniques d'identification expérimentales : Modèle de dépendance a posteriori

Le deuxième type de modèle de dépendance appelé, dans ce rapport, modèle de dépendance a posteriori, peut être beaucoup moins détaillé que le modèle théorique et se concentre principalement sur plusieurs aspects spécifiques du produit ou du système. La majorité des travaux d'ECM s'appuient sur des modèles de dépendances simples, par exemple dans [FLANAGAN et al., 2003] un modèle de dépendances entre les composants d'un excavateur est présenté sous forme d'une matrice DSM 6×6 collectée à travers l'avis des concepteurs de ce type de produit et qui ne descend pas à un niveau très détaillé (dépendances entre paramètres).

Un modèle de dépendance a posteriori n'a pas besoin de représenter des équations exactes ou des règles logiques formelles liant les paramètres. Mais il doit permettre aux analystes d'identifier la direction ou la nature des changements, et d'évaluer et prévoir au mieux les nouvelles valeurs. La majorité des travaux d'ECM s'appuient sur un modèle de dépendance a posteriori, mais aucun d'eux ne définit la valeur des nœuds cibles (affectés) obtenue après intégration d'un changement. Ce qui ne correspond pas ce que nous cherchons à adresser dans cette thèse.

Dans une approche purement basée sur un modèle a posteriori, les modèles sont uniquement employés pour rechercher le sens des variations et ne peuvent fournir aucune information sur les valeurs exactes des paramètres après la propagation de changement. Presque tous les papiers et les approches que nous avons pu examiner dans l'état de l'art utilisent des modèles de dépendance a posteriori en cherchant à établir des dépendances par l'analyse de la structure du produit ou de fonctions, par exemple à l'aide d'interviews

avec des experts ([CLARKSON et al., 2004; JARRATT et al., 2004; KELLER et al., 2005] et [ECKERT et al., 2004]).

La caractérisation de la dépendance dépend évidemment de l'objectif de l'analyse du changement. Par exemple, puisque l'objectif de la méthode CPM [CLARKSON et al., 2004] est de qualifier la possibilité d'occurrence des changements et leurs impacts potentiels, les dépendances sont décrites par des indicateurs de probabilité et d'impact.

Dans [HAMRAZ et al., 2012], les auteurs tentent d'aller plus loin dans les propriétés du produit ou du système via les trois couches (fonction, comportement et structure), qui donnent des idées sur les changements possibles du comportement du produit et, par conséquent, les services fournis aux utilisateurs. Cependant, l'analyse a été effectuée sur des modèles a posteriori, qui sont beaucoup plus simples que les modèles théoriques.

Pour résumer, les techniques liées aux modèles a posteriori consomment moins d'effort mais peuvent donner un aperçu précieux sur les décisions de conception de haut niveau et accélérer le TTM. Cependant, elles ont leurs propres inconvénients :

1. Les impacts du changement sont évalués par la probabilité d'occurrence d'un changement obtenue d'une façon subjective (manque de confiance) à travers des entretiens réalisés avec des experts du domaine de conception.
2. Elles n'aident les concepteurs que très peu à décider vers quel changement ils doivent s'orienter. Ce sont des méthodes "what-if" qui ne précisent pas des critères de choix du changement le plus adéquat.

2.4.3 Classification des méthodes

Les méthodes de gestion des changements visent à évaluer l'impact d'un changement instigateur, qui a lieu sur un composant particulier, sur les autres. Nous avons classifié les travaux d'ECM dans le Tableau 2.1 selon trois critères : la caractérisation des changements, la méthode de résolution et la technique de visualisation de propagation.

2.4.4 Motivations pour la recherche menée

Pour conclure l'état de l'art présenté dans les deux parties de ce chapitre 2, on peut constater que toutes les méthodes de propagation de changements présentées commencent par la caractérisation de la dépendance entre les éléments d'un système avant d'analyser le mécanisme de propagation des changements. Ces éléments sont généralement liés par des relations déjà connues grâce à un modèle théorique ou obtenues via des interviews des experts par exemple. Cependant, l'obtention de ce modèle de dépendance est mise en difficulté si le modèle théorique n'est pas disponible ou s'il est incomplet. Par conséquent, la construction du modèle de dépendance devra se faire alors via d'autres méthodes permettant d'obtenir un modèle approché du produit. Ce modèle, appelé, dans ce rapport, modèle de dépendance a posteriori, peut être beaucoup plus simple que le modèle théorique et se concentre principalement sur plusieurs aspects spécifiques du produit ou du système.

Dans un modèle de dépendance a posteriori, les équations exactes ou règles logiques formelles qui relient les paramètres ou éléments entre eux ne sont pas nécessaires. Ce genre de modèle permet d'obtenir des informations sur la direction ou la nature des changements et de prévoir les nouvelles valeurs de manière approchée. A part quelques exceptions comme la méthode proposée par [KUSIAK et WANG, 1995] qui utilise le modèle théorique, la majorité des travaux d'ECM s'appuient sur un modèle de dépendance a posteriori sans définir la valeur des nœuds cible obtenue après propagation d'un changement.

Dans une approche basée sur un modèle de dépendance théorique, on cherche à déterminer les nouvelles valeurs des paramètres et la direction des variations et changements relatifs pour caractériser le changement qualitativement et quantitativement. Par contre, la

TABLEAU 2.1 – Classification des méthodes de propagations de changements

Références	Caractérisation des changements			Méthode de résolution			Visualisation de propagation		
	Likelihood	Impact Qualitatif	Impact Quantitatif	Basée sur les Matrices	Basée sur un Modèle	Basée sur un Algorithme	Arbre de Propagation	Réseaux de Propagation	Indicateur de propagation
[CHENG et CHU, 2012]			*	*				*	*
[CHUA et HOSSAIN, 2012]		*		*	*				
[CLARKSON et al., 2004]	*		*	*		*	*		
[COHEN et al., 2000]		*		*	*	*		*	
[FLANAGAN et al., 2003]		*		*				*	
[GIFFIN et al., 2009]	*			*			*	*	*
[HAMRAZ et al., 2013a]	*		*	*		*	*		
[HAMRAZ et al., 2013b]	*		*	*	*				
[KELLER et al., 2005]	*		*	*			*	*	
[KIM et al., 2013]	*		*	*			*	*	*
[KUSIAK et WANG, 1995]		*	*			*		*	
[LI et ZHAO, 2014]	*		*		*			*	
[LI et al., 2016]	*		*		*		*		
[ODUNCUOGLU et THOMSON, 2011]	*			*	*				
[RUTKA et al., 2006]	*	*		*			*		
[STEWART, 1981]				*					
[YANG et DUAN, 2012]			*					*	*

quasi-majorité des approches (comme [CLARKSON et al., 2004; ECKERT et al., 2004; JARRATT et al., 2004; KELLER et al., 2005]) que nous avons examinées dans cet état de l'art utilisent des modèles de dépendance a posteriori définis à l'aide d'interviews auprès d'experts pour prédire le comportement de la propagation des changements.

Les deux types de modèles de dépendance, théoriques et a posteriori, présentent chacun des avantages et des inconvénients. D'une part, un modèle théorique est un modèle déterministe mais compliqué à obtenir vu les connaissances et l'expertise demandées. D'autre part, un modèle a posteriori utilise des techniques faciles à manipuler. Toutefois, la simplicité extrême des relations liant les paramètres du système devient un frein à l'exploitation pragmatique des préconisations des résultats de la propagation.

L'objectif principal de notre travail est de proposer une approche globale combinant l'identification de la dépendance et la propagation des changements. Pour l'identification, nous cherchons à utiliser la simplicité des techniques d'une démarche a posteriori tout en étant en mesure de fournir des paramètres avec les nouvelles valeurs (après la propagation des changements) aux travers des équations formelles comme c'est le cas dans une approche utilisant un modèle théorique.

Nous proposons d'utiliser des outils mathématiques (comme la différentielle totale), des outils d'identification (tels que la régression polynomiale) et des outils de caractérisation de la dépendance présentées dans les annexes B. La construction du modèle géométrique de simulation peut se faire par des outils de CAO. Une discrétisation des données des analyses de régression nous permettra de caractériser ensuite les dépendances entre les éléments géométriques du produit étudié.

Chapitre 3

Identification des dépendances

« The only simple truth is that there is nothing simple in this complex universe. Everything relates. Everything connects »

Johnny Rich

Sommaire

3.1 Introduction	36
3.2 Définitions	37
3.3 Formulation du problème	38
3.3.1 Hypothèses	38
3.3.2 Graphes et matrices	38
3.4 Présentation de la méthode d'identification proposée	39
3.4.1 Étape 1 : La modélisation du système	40
3.4.2 Étape 2 : La simulation des changements par variation libre	41
3.4.3 Étape 3 : L'identification préliminaire	42
3.4.4 Étape 4 : La simulation des changements par variation contrôlée	44
3.4.5 Étape 5 : La caractérisation des dépendances	45
3.4.6 Étape 6 : L'établissement du graphe de dépendance	50
3.5 Analyse des données et caractérisation des dépendances	52
3.6 Conclusion	54

3.1 Introduction

La conception et la re-conception des systèmes complexes nécessite une évaluation détaillée et précise sur les conséquences (en termes d'impacts ou de risques) d'un changement appliqué.

L'identification des dépendances d'un système est une tâche cruciale pour pouvoir ensuite évaluer l'impact de la propagation, d'un changement. En effet, en appliquant un changement bien défini à un composant d'un produit dans un but de modernisation par exemple, l'effet résultant peut se traduire par une modification de certaines valeurs/mesures des autres composants du produit.

Comme introduit dans les chapitres précédents, il existe de nombreuses méthodes, proposées dans le domaine de l'ingénierie des changements, pour évaluer les impacts de changement essentiellement pour la conception et la re-conception des systèmes.

Dans un contexte de rénovation d'un produit, on estime que trois phases sont indispensables pour étudier une demande de changement et évaluer son impact (voir Figure 3.1).

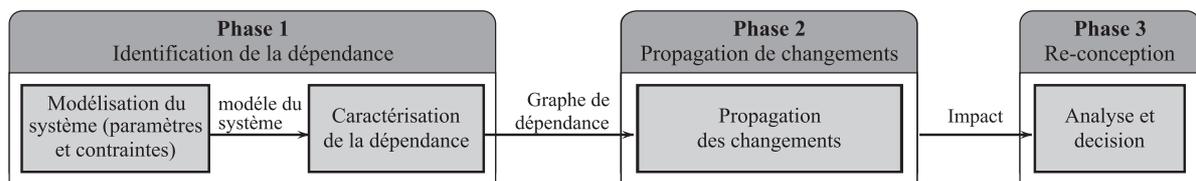


FIGURE 3.1 – Approche générale pour la rénovation d'un produit

Une première phase consiste à identifier toutes les dépendances qui existent entre les éléments du système à partir d'un modèle du produit à concevoir ou à re-concevoir, explicitant les composants et les paramètres du modèle, ainsi que les liens et contraintes entre ces composants. Ces liens entre composants et ces contraintes (liant un ou plusieurs éléments) sont autant de dépendances possibles. Dans une deuxième phase, le changement est propagé aux autres composants à travers les chemins de propagation ou canaux de propagation et l'impact correspondant est alors calculé. Enfin, dans une troisième phase, l'analyse de l'impact permet aux concepteurs de prendre leurs décisions pour valider le changement initial malgré ses conséquences sur les autres composants ou non. Dans ce chapitre, nous allons traiter exclusivement la première étape d'identification et de modélisation des dépendances.

La modélisation prise en considération dans la phase 1 est une modélisation géométrique du produit que l'on souhaite modifier ou reconcevoir. Ce type de modèle permet d'apporter des modifications au modèle du produit sans toutefois nécessiter des expérimentations ou tests sur le produit réel. Pour ce faire, il faut disposer d'un outil de conception assistée par ordinateur (CAO) capable de modifier le modèle du système étudié, *i.e.* simuler la propagation d'un changement dans un modèle géométrique du produit et fournir à l'utilisateur le nouvel état du modèle (qui est une prédiction de l'état du système réel après changement). Comme tout outil de CAO, la propagation des changements sur le modèle géométrique ne fait pas état de l'ensemble des modifications possibles pour un élément/paramètre donné mais d'une solution possible parmi plusieurs [THIERRY et al., 2010]. L'outil choisit une solution de propagation qu'il considère comme optimale et cohérente avec les contraintes imposées entre les éléments du modèle.

Un tel outil de conception assistée par ordinateur est aussi utilisé par les concepteurs lors de la phase de conception. Ce qui justifie l'utilisation de la simulation par un outil de CAO comme moyen pour l'identification des dépendances à condition de vérifier la réalisabilité des alternatives de changements proposés.

Dans nos travaux, pour l'identification des dépendances, nous avons tout d'abord utilisé une simulation basée sur la variation libre, appelée par la suite *simulation libre*, c'est-

à-dire un changement imposé de la valeur d'un paramètre et une collecte des nouvelles valeurs des autres paramètres (*i.e.* impacts de propagation).

La simulation libre permet d'identifier des fonctions polynomiales qui relient les paramètres **deux à deux**. Ces fonctions ne représentent pas forcément uniquement des dépendances/liaisons **directes**, mais aussi des dépendances **indirectes** entre deux paramètres. D'où l'idée de fixer la valeur de certains paramètres (ces paramètres et la manière de les choisir seront détaillés par la suite) et de faire varier un paramètre instigateur afin d'éliminer les dépendances indirectes et d'identifier uniquement les dépendances directes. Nous appellerons cette façon de procéder simulation basée sur la variation contrôlée ou plus simplement *simulation contrôlée*.

En résumé, la simulation libre permet la propagation des changements sur un modèle abstrait du système sans y ajouter de contraintes supplémentaires. Alors que la simulation contrôlée prend en compte des contraintes supplémentaires afin d'avoir une propagation modélisant la dépendance directe des paramètres entre eux.

Dans ce chapitre, nous allons présenter ces deux approches et indiquer leurs différences. Nous présentons au début du chapitre les différentes définitions nécessaires pour la compréhension de la suite du rapport, puis nous formulons le problème d'identification adressé. Nous terminons ce chapitre par la présentation de la méthode proposée pour l'identification des dépendances.

3.2 Définitions

Nous présentons dans cette section quelques définitions qui englobent la décomposition d'un système, les notions de changement et de dépendance, ainsi que les dénominations relatives aux graphes de dépendances.

Éléments du système Un système est défini dans notre approche par un ensemble d'éléments. Ces éléments sont des paramètres caractérisant un ou plusieurs composants physiques du système et liées par l'intermédiaire de relations de dépendance.

Changement d'un élément Un changement est défini par la modification de la valeur d'un élément de sa valeur initiale à une nouvelle valeur, l'écart étant appelé la valeur du changement imposé.

Élément instigateur/affecté Un élément est dit instigateur si on lui impose un changement. Un élément qui subit (par propagation) ce changement (initial), et dont la valeur est modifiée, est appelé affecté. Nous utilisons la distinction classique entre éléments d'un système en contexte de changement, comme [CLARKSON et al., 2004; HAMRAZ et al., 2013a] ou encore [JARRATT et al., 2011].

Dépendance entre deux éléments Un élément j est dit dépendant d'un élément i si et seulement si un changement sur i entraîne un changement sur j [ZHANG, 2013].

Caractérisation de la dépendance On dénomme par caractérisation de la dépendance l'attribution d'une valeur (numérique, symbolique ou sous forme d'expression mathématique) à la dépendance existant entre deux éléments dans un sens bien défini.

Graphe orienté/étiqueté Un graphe est dit orienté si ses arêtes ne peuvent être parcourues que dans un seul sens. L'orientation des arêtes est indiquée par des flèches sur les arêtes. Une arête orientée est appelée aussi un arc. Un graphe étiqueté est un graphe où chaque arc (ou arête) entre les sommets est affecté d'une étiquette. Ces étiquettes peuvent être un mot, un réel, un symbole, *etc.*

3.3 Formulation du problème

Selon le niveau de détail souhaité, chaque produit ou système peut être décomposé en ensemble de composants ou de sous-systèmes statiques (non dynamiques) connectés entre eux par des liaisons (mécaniques par exemple, encastrement, liaison pivot, *etc.*) et dépendants les uns des autres.

Un système peut être identifié grâce à ses composants et les paramètres associés à ces composants (*e.g.* la longueur du tube horizontal d'un vélo). Les composants interviennent dans la réalisation des fonctions (élémentaires ou non). Ces interactions entre les composants, dans la réalisation d'une fonction, peuvent rendre très difficile la détermination de relations entre les éléments des composants (*e.g.* la dépendance exacte et formalisée entre la pression dans les pneus d'un véhicule et le couple nécessaire pour tourner le volant moteur d'un degré). Dans certains cas, comme par exemple une liaison physique, les équations issues des lois de la physique permettent éventuellement d'identifier la dépendance. Toutefois, il n'est pas toujours évident de connaître le type et la valeur d'une dépendance. La plupart du temps, on connaît mal, voire on ignore s'il existe ou non une relation entre deux paramètres distincts du système. La question de son identification se pose alors.

Notre but est ici d'identifier les dépendances existantes entre les différents éléments du système et de trouver une caractérisation de ces dépendances. La connaissance de ces dépendances permettra aux concepteurs de discerner les interactions intra-système et d'évaluer l'impact direct et indirect (via un élément intermédiaire) d'un changement sur l'ensemble du système.

3.3.1 Hypothèses

Dans cette partie, nous présentons les différentes hypothèses prises en compte pour la proposition de l'approche d'identification des dépendances.

- Les éléments du système considérés sont restreints aux paramètres géométriques de celui-ci.
- Les valeurs maximales et minimales possibles d'un paramètre sont connues d'avance et fournies par les concepteurs ou les experts de la conception du système.
- Le changement initial peut être imposé sur n'importe quel élément du système. Autrement dit, tout élément peut être considéré comme élément instigateur.
- Un seul changement initial est appliqué à la fois.
- L'impact d'un paramètre affecté est évalué par la variation de sa valeur après l'application du changement initial.

3.3.2 Graphes et matrices

Notre approche d'identification des dépendances fournit comme sorties deux types de représentations graphiques se basant sur deux structures de données : les graphes et les matrices. Ce sont des outils mathématiques que l'on peut représenter en utilisant les mêmes données.

Les deux sorties résultantes sont liées : la matrice est la matrice d'adjacence (binaire ou son extension au cas numérique ou expression mathématique) du graphe correspondant. Le contenu d'une matrice correspond au système d'étiquettes du graphe.

Mais chacune de ces représentations présente des intérêts différents selon le type d'analyses que l'on souhaite effectuer ultérieurement. Les différentes matrices caractérisent la dépendance (selon différentes caractérisations : booléenne, numérique, expression mathématique) des éléments du système deux à deux, et le graphe orienté étiqueté donne un aperçu global des dépendances existantes dans le système étudié.

Ces deux formes de résultats seront présentées et comparées avec plus de détails plus tard.

3.4 Présentation de la méthode d'identification proposée

L'approche proposée pour l'identification des dépendances se compose de six étapes : la modélisation du système, la simulation libre, l'identification préliminaire, la simulation contrôlée, la caractérisation des dépendances et l'établissement du graphe de dépendance (voir Figure 3.2).

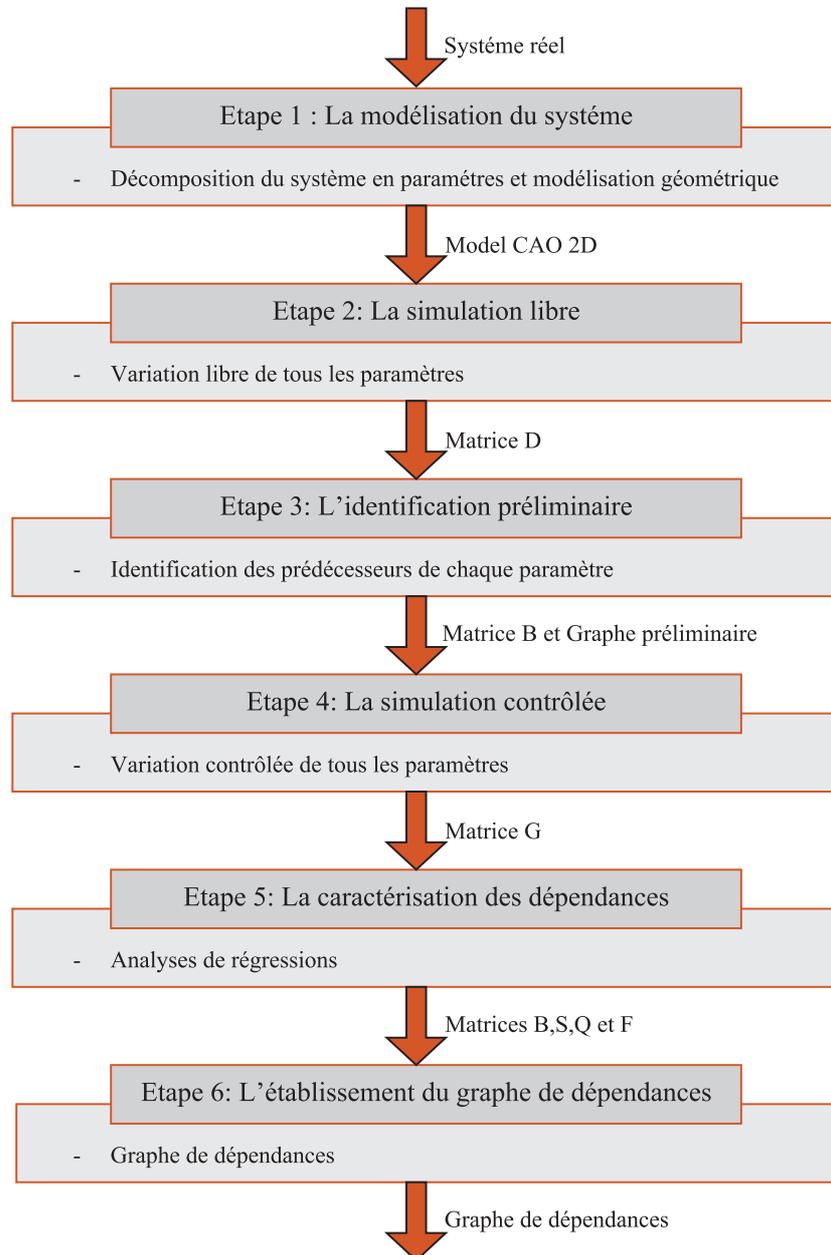


FIGURE 3.2 – Les six étapes de la méthode proposée

À la première étape, nous créons un modèle géométrique (s'il n'existe pas) du système en définissant ses différents paramètres (qui sont, soit des longueurs, soit des angles). Ce modèle doit contenir également un ensemble de contraintes, permettant de transcrire les contraintes techniques du système modélisé. L'approche nécessite que le modèle soit simulable, autrement dit que l'outil de modélisation puisse propager un changement sur l'ensemble des composants du modèle. Ici, nous utilisons le logiciel de Conception Assis-

tée par Ordination (CAO) CATIA, qui permet de conserver la cohérence d'un modèle, vis-à-vis des contraintes spécifiées, suite à une modification d'un des paramètres de celui-ci. Ensuite, à l'étape 2, pour chaque paramètre du modèle (longueurs et angles), nous allons procéder par une simulation (des changements par variation) libre. De façon itérative, un des paramètres est sélectionné et sa valeur est modifiée dans son domaine de définition tout en collectant les valeurs des autres paramètres. Cela permet d'identifier un premier ensemble de paramètres dépendants. Sur la base de ces résultats, à l'étape 3, nous identifions un graphe de dépendance préliminaire. Nous utilisons la notion de différentielle totale pour définir un nouveau protocole de simulation dans la quatrième étape, appelée "simulation des changements par variation contrôlée". Dans la cinquième étape, nous explicitons les dérivées partielles qui expriment la variation d'un paramètre en raison des variations de tous les autres paramètres dont il dépend. Ces dérivées partielles doivent être agrégées par la suite de manière à obtenir la variation totale d'une variable à partir de la connaissance de ses dérivées partielles. À la fin de ce processus, on obtient un graphe de dépendance reliant les paramètres entre eux, chaque dépendance prenant la forme d'une équation algébrique fonction de deux paramètres liés. Dans cette section, nous présentons la méthode d'identification en détaillant ses six étapes, une à une, et en illustrant chacune d'elles sur un exemple explicatif simple.

3.4.1 Étape 1 : La modélisation du système

La première étape consiste à construire un modèle du système ou produit étudié. Ce modèle contient toutes les informations relatives à sa structure/architecture du système, sa composition en termes de composants et de paramètres correspondants et aux contraintes associées à ces paramètres (de manière unitaire) et entre ces paramètres (par couple). Ces informations peuvent être déduites de la nomenclature, du cahier de charge, des spécifications géométriques, *etc.* ou même depuis les normes de qualité du produit. Dans le cas d'une re-conception, un modèle géométrique initial peut exister et peut servir de base à l'établissement du modèle de conception. Dans une approche de conception classique, la modélisation est initialement effectuée en 2 dimensions (2D), pour ensuite être étendue à un modèle 3D [DELAMÉ et al., 2011]. Ce type de modèle peut être créé grâce à un logiciel de CAO tel que CATIA. Un modèle 2D contient n éléments appelés "paramètres". Chaque paramètre $P_i, \forall i = 1..n$ peut être soit une longueur L_a soit un angle θ_b .

Afin d'assurer un lien entre les différents segments ou points du modèle, il est nécessaire d'imposer entre eux certaines contraintes. Les contraintes sont définies comme des restrictions et/ou des associations qui sont appliquées à la géométrie du modèle 2D. Les contraintes peuvent être divisées en deux catégories. Les contraintes de définition associent un domaine de définition à un paramètre donné. La seconde classe de contraintes, appelées contraintes de structure, imposent des relations entre les éléments géométriques. Ce sont toutes les contraintes nécessaires et suffisantes pour définir un objet géométrique dans une esquisse 2D sous un logiciel de CAO.

Les différents types de contraintes utilisées sont décrits comme suit :

- Les contraintes de définition
 - Des contraintes sur les longueurs (C_L)
 - Des contraintes sur les angles (C_A)
- Les contraintes de structure
 - Des contraintes de parallélisme (C_P)
 - Des contraintes de coïncidence (C_C)
 - Des contraintes de distance entre deux droites (C_D)
 - Des contraintes de concentricité (C_O)

— Des contraintes de fixation (C_F)

L'ensemble de ces contraintes est noté C , avec :

$$C = C_L \cup C_A \cup C_P \cup C_C \cup C_D \cup C_O \cup C_F \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \text{Modèle} &= \{P_i, i = 1 \dots n / C \text{ sont vérifiées}\} \quad (3.2) \\ &= \{\{L_a, a = 1 \dots n_1\} \cup \{\theta_b, b = 1 \dots n_2\} / \{C_L \cup C_A \cup C_P \cup C_C \cup C_D \cup C_O \cup C_F\} \text{ sont vérifiées}\} \\ &\text{avec } n = n_1 + n_2 \end{aligned}$$

On définit par x_i^0, \bar{x}_i et \underline{x}_i respectivement la valeur initiale, les limites supérieure et inférieure de chaque paramètre d'indice $i, \forall i = 1 \dots n$. Comme indiqué dans la section 3.1, ces limites (présentées sous forme d'inégalités dans les contraintes de définition C_L et C_θ) sont déterminées par les concepteurs selon les normes et/ou l'historique des expériences précédentes. Elles peuvent être également obtenues grâce à des expérimentations réalisées sur le modèle géométrique sous le logiciel de CAO en vérifiant à chaque fois la faisabilité du modèle. Par exemple, dans le cas d'un vélo, la hauteur du guidon est limitée par une contrainte de structure et est contrainte entre deux valeurs transcrivant la taille des utilisateurs potentiels, en se référant à la norme internationale [International Standards Organization \(ISO\)](#) pour bicyclettes [[ISO-4210, 2014](#)]. Les tests et les expérimentations qui ont été effectuées permettent de caractériser les limites de chaque paramètre (sous forme de contraintes de définitions) dans le but d'avoir un modèle d'un vélo "cyclable", c'est-à-dire, utilisable :

- géométriquement, en satisfaisant à toutes les contraintes de structure définies,
- fonctionnellement, de manière à garantir que le vélo puisse assurer ses fonctions (rouler, par exemple).

3.4.2 Étape 2 : La simulation des changements par variation libre

La simulation libre correspond par une série d'expérimentations et de tests réalisés sous un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur. Il s'agit de faire varier la valeur initiale d'un paramètre instigateur au sein de son domaine de définition et d'observer l'influence de ce changement sur les autres paramètres (i.e. s'ils sont affectés ou non).

Comme indiqué dans l'algorithme 3 dans l'annexe A, à chacune des expérimentations, nous choisissons un paramètre particulier d'indice i . Il devient alors le paramètre instigateur. Sa valeur x_i peut varier autour de sa valeur initiale x_i^0 dans l'intervalle de définition noté par $X_i = [\underline{x}_i; \bar{x}_i]$. La valeur initiale du paramètre instigateur n'est pas nécessairement située au milieu de son intervalle de définition.

N.B. : Nous cherchons donc à déterminer la variation potentielle des autres paramètres en fonction des variations de celle du paramètre instigateur. Il est important donc de souligner que lors de la simulation libre, tous les paramètres deviennent tour à tour le paramètre instigateur. Le paramètre instigateur global correspondant à la demande de changement au niveau de la re-conception correspondra à l'un des paramètres du modèle. •

On note δ_i la différence entre la nouvelle valeur du paramètre instigateur x_i et sa valeur initiale x_i^0 , ce qui peut s'écrire $\hat{x}_i = x_i^0 + \delta_i$ avec $\delta_i \in \mathfrak{R}$, le changement imposé à l'élément instigateur.

De manière à pouvoir caractériser au mieux les dépendances entre éléments et ne pas obtenir une approximation seulement valide au voisinage de la valeur initiale, il est nécessaire d'évaluer l'impact d'un changement pour la plage de valeurs correspondant à l'intervalle de définition X_i . Dans le cas d'intervalle de définition continu, une discrétisation de

l'intervalle $X_i = [\underline{x}_i; \overline{x}_i]$ est nécessaire. Pour cela, nous avons choisi un échantillonnage à pas fixe $\sigma_i = cte$ en prenant k_i valeurs successives distinctes dans cet intervalle.

Pour une expérimentation dont le paramètre instigateur est d'indice i , le pas d'échantillonnage fixe peut être assuré, soit en fixant la valeur constante du pas d'échantillonnage σ_i pour obtenir ensuite la valeur de k_i , soit en fixant k_i . Dans les deux cas, le pas d'échantillonnage $\sigma_i = \frac{\overline{x}_i - \underline{x}_i}{k_i}$ reste toujours une valeur constante.

La Figure 3.3 représente la discrétisation de la variation d'un paramètre x_1 et d'un deuxième paramètre x_2 sur l'intervalle $[1;5]$ avec un pas d'échantillonnage fixe. On pose $\sigma_1 = \sigma_2 = 1$ comme indiqué dans la Figure 3.3 pour les expérimentations propres à un changement sur x_1 (à gauche) et x_2 (à droite). On représente donc les variations de x_3 respectivement par rapport aux variations de x_1 et x_2 .

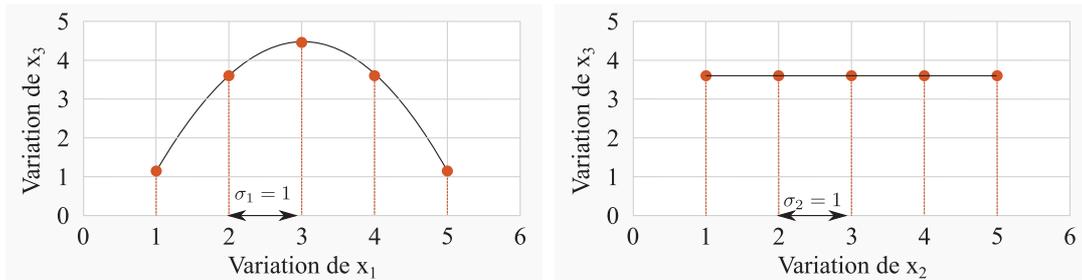


FIGURE 3.3 – Méthode de discrétisation avec pas d'échantillonnage fixe

Il existe d'autres méthodes de discrétisation permettant d'avoir des pas d'échantillonnage différant selon le couple considéré ou d'adapter le pas d'échantillonnage en fonction de la courbe. Un exemple possible, présenté dans la Figure 3.4, consiste à choisir un pas d'échantillonnage différent pour les différents paramètres, c'est-à-dire $\sigma_i \neq \sigma_j, \forall i \neq j$.

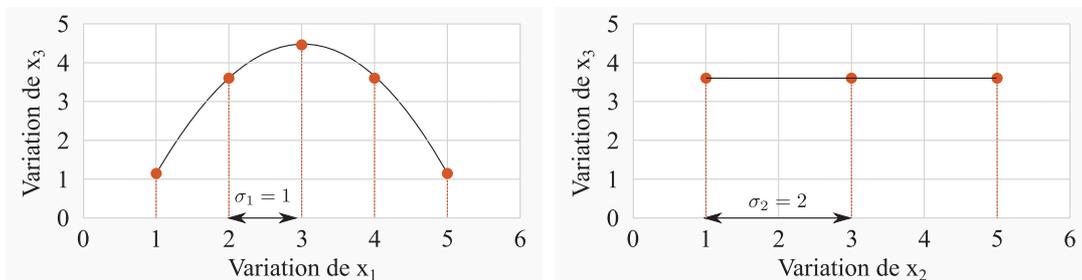


FIGURE 3.4 – 1ère méthode de discrétisation avec pas d'échantillonnage variable

Une autre possibilité aurait pu être de choisir un pas d'échantillonnage qui, pour un paramètre instigateur donné, varie en fonction de l'évolution du paramètre affecté. La Figure 3.5 montre deux exemples d'application de cette deuxième méthode. Pour l'exemple à gauche, le pas d'échantillonnage varie de 1 à 0.5 selon le besoin de détails voulu.

Une fois l'expérimentation définie, en choisissant le paramètre à changer, le paramètre impacté (à mesurer) et la méthode de discrétisation (le pas d'échantillonnage ou le nombre de points k_i), on peut effectuer la simulation pour quantifier et/ou qualifier l'impact du changement.

3.4.3 Étape 3 : L'identification préliminaire

Les résultats de la deuxième étape (simulation libre), représentés par les nouvelles valeurs des paramètres après changement, sont collectées et conservées dans une table à

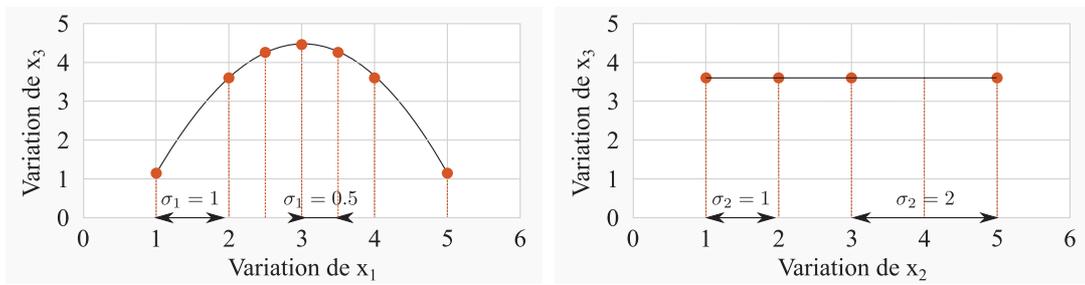


FIGURE 3.5 – 2ème méthode de discrétisation avec pas d'échantillonnage variable

trois dimensions appelée $D = (d_{i,j,k})_{1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n, 1 \leq k \leq \max_i k_i}$. La première dimension correspond aux paramètres variables i considérés tour à tour comme paramètre instigateur, la deuxième dimension aux paramètres impactés j et la troisième dimension aux différentes expérimentations (en nombre égal au nombre d'échantillons k_i). Chaque vecteur de D associé à un indice i et un échantillon dans $1 \dots k_i$ correspond à l'expérimentation réalisée avec i comme paramètre instigateur pour ce changement (correspondant à l'échantillon numéroté entre 1 et k_i).

Pour chaque couple de paramètres (i, j) et à partir des résultats des expérimentations d'indices i, j et $k, \forall k \in \{1, \dots, k_i\}$ sauvegardés dans la matrice D , nous calculons, à l'aide de l'équation suivante, la variance statistique des nouvelles valeurs du paramètre j après les k_i changements du paramètre instigateur i .

$$v_{i,j} = \frac{1}{k_i} \sum_{k=1}^{k_i} \left(d_{i,j,k} - \frac{1}{k_i} \sum_{k=1}^{k_i} d_{i,j,k} \right)^2 \quad (3.3)$$

Dans la théorie des probabilités et statistiques, la variance sert à mesurer la dispersion d'une série statistique autour de sa moyenne. Une variance qui vaut zéro indique que toutes les valeurs du paramètre affecté sont identiques. On définit ensuite la matrice binaire B , qui montre s'il existe ou pas une variation de la valeur d'un paramètre affecté suite à la variation de la valeur du paramètre instigateur.

- **La Matrice de Dépendance Binaire** notée par $B = (b_{i,j})_{1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m}$ et définie par :

$$b_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si } v_{i,j} \neq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.4)$$

Les composantes de la matrice B peuvent être représentées aussi sous la forme d'un graphe orienté appelé graphe préliminaire de dépendance. Dans ce graphe, les paramètres et leurs dépendances binaires correspondent aux nœuds et arcs, respectivement.

A partir de la matrice binaire B ou du graphe correspondant, on peut déduire les prédécesseurs de chacun des nœuds. En effet, en lisant la matrice, et pour un j donné, tous les i tels que $b_{ij} = 1$ sont des prédécesseurs directs. Un raisonnement itératif permet d'obtenir les prédécesseurs indirects de rang plus important. Dans un graphe de dépendance préliminaire et pour un paramètre j donné, les arcs entrant au nœud j sont tous des prédécesseurs directs du nœud j .

Cette matrice binaire peut être vue comme la matrice d'adjacence du graphe de dépendance orienté étiquetée avec des étiquettes binaires.

Prenons maintenant l'exemple d'un système dont le modèle comporte trois paramètres ($n = 3$). En suivant l'étape précédente, on va appliquer le principe de simulation libre en changeant à chaque fois une valeur d'un paramètre dans son domaine de définition.

Le Tableau 3.1 indique les valeurs initiales des trois paramètres, notés x_i et leurs nouvelles valeurs après changement. Chaque ligne de ce tableau présente une expérimentation dont la nouvelle valeur du paramètre instigateur qui lui est propre est indiquée en gras.

TABLEAU 3.1 – Résultats de l'identification préliminaire pour l'exemple

Nom du paramètre	P ₁	P ₂	P ₃
Valeur initiale	$x_1^0 = 20$	$x_2^0 = 25$	$x_3^0 = 30$
Paramètre instigateur	Nouvelles valeurs des paramètres (\hat{x}_j)		
P₁	$\hat{x}_1 = 19$	$\hat{x}_2 = 24,5$	$\hat{x}_3 = 30,485$
	$\hat{x}_1 = 21$	$\hat{x}_2 = 25,5$	$\hat{x}_3 = 30,97$
	$\hat{x}_1 = 22$	$\hat{x}_2 = 26$	$\hat{x}_3 = 31,455$
P₂	$\hat{x}_1 = 20$	$\hat{x}_2 = 24$	$\hat{x}_3 = 30$
	$\hat{x}_1 = 20$	$\hat{x}_2 = 26$	$\hat{x}_3 = 30$
	$\hat{x}_1 = 20$	$\hat{x}_2 = 27$	$\hat{x}_3 = 30$
P₃	$\hat{x}_1 = 20$	$\hat{x}_2 = 27,02$	$\hat{x}_3 = 29$
	$\hat{x}_1 = 20$	$\hat{x}_2 = 26,02$	$\hat{x}_3 = 31$
	$\hat{x}_1 = 20$	$\hat{x}_2 = 30,08$	$\hat{x}_3 = 32$

Au vu des données du Tableau 3.1, on peut obtenir la matrice de dépendance binaire B présentée dans le Tableau 3.2.

TABLEAU 3.2 – Matrice Binaire B pour l'exemple

$B_{i,j}$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
$i = 1$	*	1	1
$i = 2$	0	*	0
$i = 3$	0	1	*

La Figure 3.6 contient le graphe orienté, à 3 nœuds et 3 arcs, correspondant à la matrice d'adjacence B.

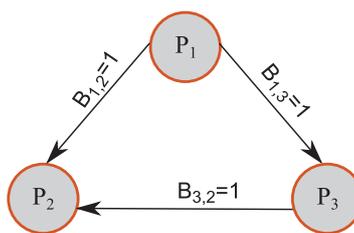


FIGURE 3.6 – Graphe de dépendance pour l'exemple

A la lecture de ce graphe, on peut déduire que P₃ ne possède qu'un seul prédécesseur P₁. P₂, à son tour, a deux prédécesseurs P₁ et P₃. Enfin, P₁ n'a aucun prédécesseur. Ces informations de précédence seront utiles pour l'étape suivante.

3.4.4 Étape 4 : La simulation des changements par variation contrôlée

Le principe de cette étape est de répéter certaines simulations de changements pour la deuxième fois en fonction des résultats trouvés dans l'étape d'identification préliminaire et se basant sur la notion de différentielle totale.

Pour pouvoir obtenir la différentielle totale d'une fonction à plusieurs variables, nous cherchons à calculer la dérivée partielle de cette fonction selon les modifications imposées à une de ses variables, alors que les autres sont maintenues constantes. Les lecteurs peuvent trouver un rappel des notions de différentielle totale et dérivée partielles dans l'annexe B.4 de ce manuscrit.

Par conséquent, pour un nœud donné x , et connaissant ses prédécesseurs depuis l'étape précédente, un de ses prédécesseurs est utilisé comme étant un nœud instigateur (*i.e.* sa valeur varie d'une expérimentation à une autre), tandis que les valeurs des autres paramètres sont maintenues fixes. C'est la raison pour laquelle l'étape est désignée par simulation (par variation) contrôlée. Pour effectuer ces simulations, nous utilisons ici les mêmes domaines de définition des paramètres et les mêmes hypothèses d'échantillonnage, comme utilisés à l'étape 2.

Une fois la simulation des expérimentations terminée, nous passons à un autre prédécesseur. Ces instructions sont répétées jusqu'à parcourir l'ensemble des prédécesseurs d'un nœud, et ce, pour tous les nœuds. Cette façon de procéder est directement extraite de la définition de la différentielle totale en fonction des dérivées partielles de ces variables.

Les résultats de la simulation par variation contrôlée de tous les paramètres du système sont ensuite collectés et enregistrés dans une table à trois dimensions nommée $G = (g_{i,j,k})_{1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n, 1 \leq k \leq \max_i k_i}$ afin de pouvoir les utiliser plus tard dans d'autres calculs.

Chaque $g_{i,j,k}$ représente l'écart ou la variation entre la valeur initiale d'un paramètre P_j notée par x_j^0 et sa nouvelle valeur \hat{x}_j après la k -ème modification (expérimentation) de P_i , où i, j et k représentent les indices du paramètre instigateur, du paramètre affecté et d'échantillonnage respectivement.

3.4.5 Étape 5 : La caractérisation des dépendances

Afin de caractériser la dépendance entre les paramètres d'une façon plus précise que celle effectuée dans l'étape 2 (dépendance existante ou non) et en se basant sur les entrées du tableau G , nous proposons les matrices suivantes :

- **La matrice de dépendance quantitative**, notée par $Q = (q_{i,j})_{1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n}$ et définie par la pente de la droite de régression ou la pente de la tangente au point initial :

$$q_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{k_i} z_{i,k} \left(x_j^0 + g_{i,j,k} - \frac{1}{k_i} \sum_{k=1}^{k_i} (x_j^0 + g_{i,j,k}) \right)}{\sum_{k=1}^{k_i} (z_{i,k})^2} \quad (3.5)$$

Avec $z_{i,k} = \underline{x}_i + (k-1)\sigma_i - \frac{1}{k_i} \sum_{k=1}^{k_i} (\underline{x}_i + (k-1)\sigma_i)$.

La matrice Q mesure la dépendance quantitative existante entre le paramètre changé et les paramètres concernés par le changement. Elle permet de comparer et de classer les différentes relations de dépendance entre les éléments du système.

- **La matrice de dépendance qualitative**, notée par $S = (s_{i,j})_{1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n}$, et définie par :

$$s_{i,j} = \begin{cases} +1 & \text{si } q_{i,j} > 0 \\ -1 & \text{si } q_{i,j} < 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.6)$$

Le matrice S de dépendance qualitative caractérise la dépendance d'une façon plus spécifique et détaillée que la matrice B et indique le signe de la variation de P_j quand

on applique un changement à la valeur d'un autre paramètre P_i . En outre, à partir de la matrice de dépendance quantitative, on peut déduire la valeur de la matrice de dépendance qualitative, en prenant à chaque fois le signe de $q_{i,j}$.

Ces deux matrices sont couramment utilisées dans la littérature pour caractériser la dépendance quantitativement et/ou qualitativement, ce qui est notamment le cas des travaux de [KUSIAK et WANG, 1995].

- **La matrice de dépendance fonctionnelle**, notée par $F = (q_{i,j})_{1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n}$, et définie par l'expression de la fonction de dépendance depuis P_i vers P_j :

$$f_{i,j} = \begin{cases} \delta_j = \sum_{l=0}^L a_l \delta_i^l & \text{si } b_{i,j} = 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.7)$$

Où L est le plus haut degré du polynôme (si T = linéaire, $L = 1$) et $x_l \in \mathfrak{R}, \forall l = 1 \dots L$.

Cette matrice contribue à une meilleure description et caractérisation de la relation de dépendance, requise pour une bonne compréhension des interactions entre les éléments du système.

Chaque fonction $f_{i,j}$ identifiée (sous forme de polynômes), à l'aide de la simulation contrôlée, représente la fonction reliant les variations d'un paramètre P_i aux variations du paramètre P_j . Cette nouvelle caractérisation des dépendances identifiées sous forme de fonctions polynômes reliant les paramètres deux à deux, représentent les dérivées partielles (ou dérivée totale dans certains cas) de fonctions multi variables servant à calculer les valeurs d'un paramètre donné dépendant de plusieurs autres paramètres. Ce point sera précisé clairement dans la présentation de la prochaine étape.

L'identification de ces fonctions polynômiales nécessite des analyses de régression (voir l'annexe B.3). Nous proposons un processus d'analyse de régression (représenté sur la Figure 3.7) pour renseigner les éléments (polynômes) de la matrice de dépendance fonctionnelle F .

Pour chaque dépendance existante identifiée dans l'étape d'identification préliminaire par simulation libre ($b_{i,j} = 1$), reliant deux paramètres P_i et P_j , on envisage d'abord qu'il s'agit d'une dépendance linéaire. Après avoir réalisé une régression linéaire, en prenant comme abscisses les k_i valeurs du paramètre P_i et comme ordonnées celles du paramètre P_j , on évalue la qualité de la régression effectuée. Cette évaluation est faite par la vérification du coefficient de détermination linéaire (R^2) s'il est proche de la valeur 1 ($R^2 \geq 0.99$). Ce coefficient mesure à quel point la régression représente les données réelles en calculant la différence entre les valeurs réelles et celles estimées par l'équation linéaire.

Si la droite de régression passe par la majorité des points (ou approximativement proche d'eux) sur le nuage de points, alors la valeur du coefficient de détermination est proche de 1. Dans ce cas, on affecte l'équation identifiée ($\delta_j = a_1 \delta_i + a_0$ avec $a_0, a_1 \in \mathfrak{R}$) à la cellule $f_{i,j}$ de la matrice F .

Sinon, nous procédons à une régression polynômiale d'ordre l où l est le premier entier, tel que $1 \leq l \leq 7$ et qui est caractérisée par un coefficient de corrélation proche de 1 ($R^2 \geq 0.99$). Nous avons observé qu'une augmentation du degré de polynôme de régression pour des valeurs supérieures à 6 ne contribuait plus à une meilleure régression mais au contraire, elle augmentait le temps de calculs. Dans le cas d'une dépendance polynomiale, la cellule de la matrice F d'indice (i, j) prend la forme $\delta_j = \sum_{l=0}^n a_l \delta_i^l$ avec $a_l \in \mathfrak{R}, \forall l \in [0 \dots n]$.

Pour plus de détails concernant cette étape de caractérisation des dépendances, le lecteur est invité à consulter l'algorithme 3 dans l'annexe A.

Considérons le même exemple donné précédemment dans le Tableau 3.1. P_3 possède un unique prédécesseur, donc il est facile d'identifier la fonction polynomiale reliant la

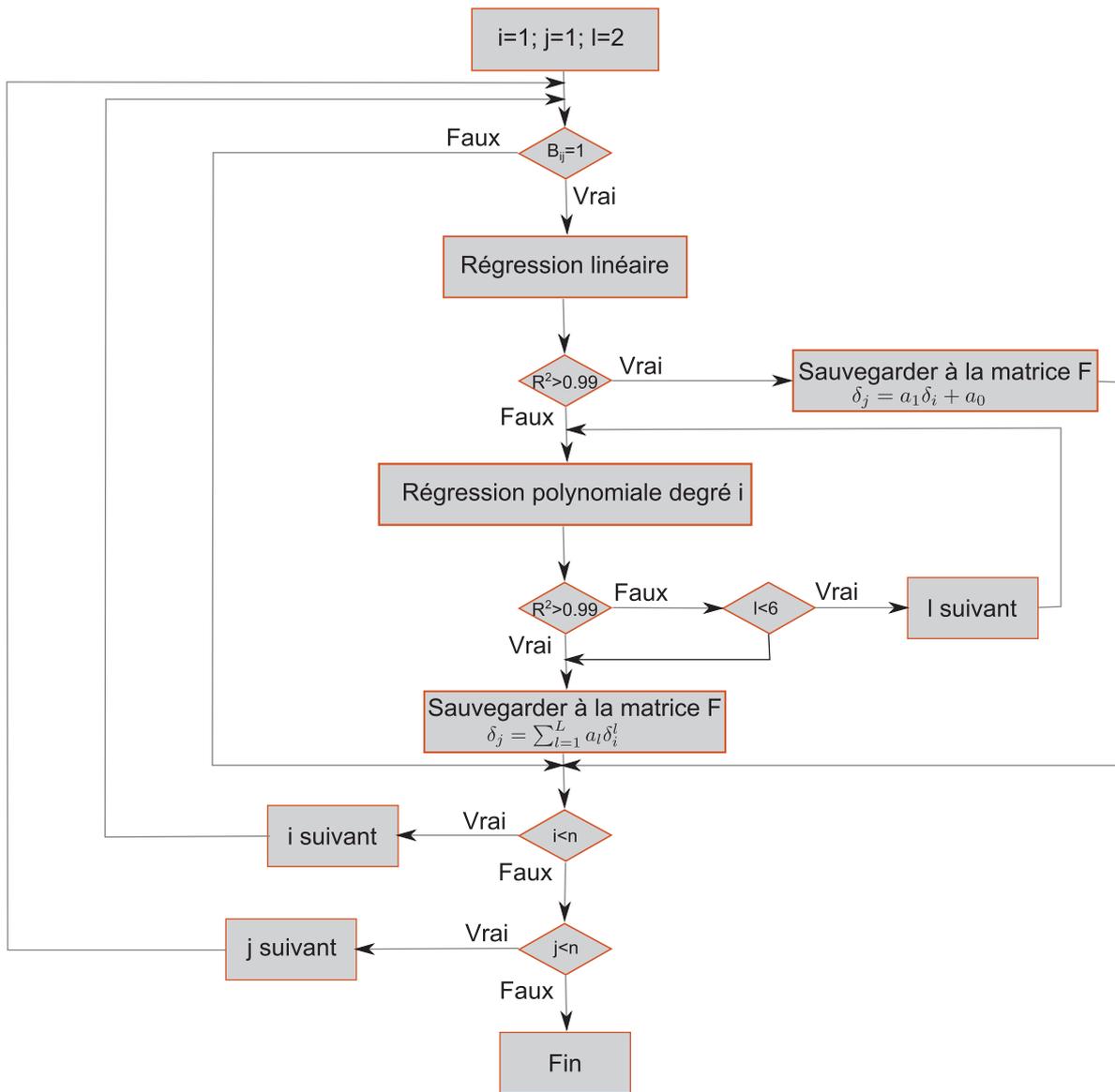


FIGURE 3.7 – Processus d'analyse de régression

variation de P_1 à celle de P_3 . Cette fonction correspond à la dérivé totale de la fonction de variation P_3 .

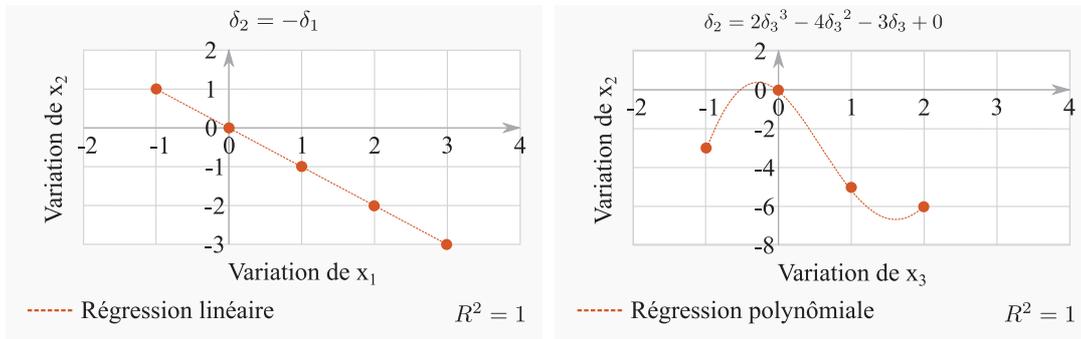
Cependant, pour le paramètre P_2 , qui a deux prédécesseurs P_1 et P_3 , deux simulations sont nécessaires (voir Tableau 3.3).

Dans la première simulation (série d'expérimentations), nous fixons la valeur de P_3 à sa valeur initiale ($\hat{x}_3 = x_3^0 = 30$) et faisons ensuite varier la valeur du paramètre P_1 dans son domaine de définition X_1 . Ensuite, nous fixons la valeur de P_1 à sa valeur initiale et faisons varier P_3 . Après ces deux simulations, deux fonctions polynômes sont identifiées par régression.

La première (*resp.* seconde) fonction est désignée par $f_{1,2}$ (*resp.* $f_{3,2}$) et définie par la fonction polynomiale de la variation δ_2 selon la variation δ_1 (*resp.* δ_3). La notation des variations (δ_i) correspond, selon le théorème de différentielle totale, aux variations infinitésimales dx_i .

TABLEAU 3.3 – Exemples de résultats d'un changement sur le paramètre P_1

Paramètre instigateur			Parametre fixé			Paramètre affecté		
P_1	$\hat{x}_1 = 19$	$\delta_1 = -1$	P_3	$\hat{x}_3 = 30$	$\delta_3 = 0$	P_2	$\hat{x}_2 = 26$	$\delta_2 = 1$
	$\hat{x}_1 = 20$	$\delta_1 = 0$		$\hat{x}_3 = 30$	$\delta_3 = 0$		$\hat{x}_2 = 25$	$\delta_2 = 0$
	$\hat{x}_1 = 21$	$\delta_1 = 1$		$\hat{x}_3 = 30$	$\delta_3 = 0$		$\hat{x}_2 = 27$	$\delta_2 = 2$
	$\hat{x}_1 = 22$	$\delta_1 = 2$		$\hat{x}_3 = 30$	$\delta_3 = 0$		$\hat{x}_2 = 28$	$\delta_2 = 3$
P_3	$\hat{x}_3 = 29$	$\delta_3 = -1$	P_1	$\hat{x}_1 = 20$	$\delta_1 = 0$	P_2	$\hat{x}_2 = 22$	$\delta_2 = -3$
	$\hat{x}_3 = 30$	$\delta_3 = 0$		$\hat{x}_1 = 20$	$\delta_1 = 0$		$\hat{x}_2 = 25$	$\delta_2 = 0$
	$\hat{x}_3 = 31$	$\delta_3 = 1$		$\hat{x}_1 = 20$	$\delta_1 = 0$		$\hat{x}_2 = 20$	$\delta_2 = -5$
	$\hat{x}_3 = 32$	$\delta_3 = 2$		$\hat{x}_1 = 20$	$\delta_1 = 0$		$\hat{x}_2 = 19$	$\delta_2 = -6$



(a) $f_{1,2}$ (Simulation contrôlée)

(b) $f_{3,2}$ (Simulation contrôlée)

FIGURE 3.8 – Courbes de dépendances des variations par simulation contrôlée

Les deux fonctions indiquant la variation de P_2 avec la variation de P_1 et P_3 sont représentées dans la Figure 3.8. La dépendance $P_1 \rightarrow P_2$ est linéaire et son équation est de la forme $\delta_2 = a_1\delta_1 + a_0$ avec $a_0, a_1 \in \mathfrak{R}$ (voir Figure 3.8a). Dans la Figure 3.8b, la courbe correspond une relation polynomiale reliant la variation de P_3 à celle de P_2 . Dans ce cas, la dépendance n'est plus linéaire, mais polynomiale.

En appliquant ce processus de régression, pour chaque paramètre P_j qui dépend des paramètres prédécesseurs ($i \in \{1, \dots, m\} \setminus \{j\}$), sa différentielle totale peut être exprimée selon la dérivée partielle de m , comme suit :

$$dx_j = \left(\frac{\partial x_j}{\partial x_1}\right) dx_1 + \left(\frac{\partial x_j}{\partial x_2}\right) dx_2 + \dots + \left(\frac{\partial x_j}{\partial x_m}\right) dx_m = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^m \left(\frac{\partial x_j}{\partial x_i}\right) dx_i \quad (3.8)$$

Les différentes dérivées partielles $\left(\frac{\partial x_j}{\partial x_i}\right)$ peuvent être obtenues avec les fonctions identifiées $f_{i,j}$ et représentent la variation du paramètre P_j lorsque les valeurs de tous les autres paramètres k ($\forall k \in \{1, \dots, m\} \setminus i$) sont fixées. En appliquant l'approximation suivante $\delta_i \rightarrow dx_i$, la dernière équation devient :

$$dx_j(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m) = f'_{1,j}(\delta_1)\delta_1 + f'_{2,j}(\delta_2)\delta_2 + \dots + f'_{m,j}(\delta_m)\delta_m = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^m f'_{i,j}(\delta_i)\delta_i \quad (3.9)$$

Après l'obtention de la valeur de la variation différentielle totale, nous pouvons calculer la nouvelle valeur du paramètre P_j en ajoutant sa valeur initiale x_j^0 , ce qui s'écrit :

$$\hat{x}_j(x_1, x_2, \dots, x_m) = x_j^0 + dx_j(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m) \quad (3.10)$$

Pour l'exemple précédent, les variations des paramètres peuvent s'écrire comme suit :

$$\delta_{2,p_3=cst} = f_{1,2}(\delta_1) \quad \text{et} \quad \delta_{2,p_1=cst} = f_{3,2}(\delta_3) \quad (3.11)$$

En utilisant la régression linéaire et/ou polynomiale, les deux fonctions identifiées sont :

$$\begin{aligned} f_{1,2}: \quad \mathfrak{R} &\rightarrow \mathfrak{R} \\ \delta_1 &\rightarrow -\delta_1 \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} f_{3,2}: \quad \mathfrak{R} &\rightarrow \mathfrak{R} \\ \delta_3 &\rightarrow 2\delta_3^3 - 4\delta_3^2 - 3\delta_3 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Ces deux fonctions étant continues et dérivables sur \mathfrak{R} , leurs fonctions dérivées s'expriment de la manière suivante :

$$\begin{aligned} f'_{1,2}: \quad \mathfrak{R} &\rightarrow \mathfrak{R} \\ \delta_1 &\rightarrow -1 \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} f'_{3,2}: \quad \mathfrak{R} &\rightarrow \mathfrak{R} \\ \delta_3 &\rightarrow 6\delta_3^2 - 8\delta_3 - 3 \end{aligned} \quad (3.15)$$

Par exemple, pour le paramètre P_2 qui dépend de P_1 et P_3 , nous pouvons écrire sa différentielle totale comme :

$$dx_2 = \left(\frac{\partial x_2}{\partial x_1}\right) dx_1 + \left(\frac{\partial x_2}{\partial x_3}\right) dx_3 \quad (3.16)$$

$$= f'_{1,2}(\delta_1)\delta_1 + f'_{3,2}(\delta_3)\delta_3 \quad (3.17)$$

$$= -\delta_1 + (6\delta_3^2 - 8\delta_3 - 3)\delta_3 \quad (3.18)$$

Nous retrouvons finalement la nouvelle valeur du paramètre affecté P_2 :

$$\hat{x}_2(x_1, x_3) = x_2^0 + dx_2 = x_2^0 - \delta_1 + (6\delta_3^2 - 8\delta_3 - 3)\delta_3 \quad (3.19)$$

La formule 3.19 montre donc que, en connaissant les variations relatives aux paramètres P_1 et P_3 , nous sommes en mesure de calculer la variation totale du paramètre P_2 .

3.4.6 Étape 6 : L'établissement du graphe de dépendance

Dans cette dernière étape, les dépendances sont modélisées par un graphe orienté $G = (N, E)$ dont :

- N est l'ensemble de $n = |N|$ nœuds ou sommets représentant les paramètres du système.
- $E \subset N \times N$ est l'ensemble d'arcs reliant deux sommets $e = (i, j), e \in E, (i, j) \in N^2$.

Les valeurs x_i et les fonctions $f_{i,j}$ sont associées respectivement à des nœuds i et des arêtes $e = (i, j)$. Les quantités $f_{i,j}$ caractérisent la dépendance fonctionnelle entre les nœuds i et j .

En reprenant ce qui est dit précédemment dans l'étape 4 avec la notation introduite dans cette section, nous pouvons dire que le nœud j dépend du nœud i si et seulement si un changement de la valeur x_i , noté par δ_i , modifie la valeur x_j du nœud j , lorsque les autres prédécesseurs du nœud j sont fixées à leurs valeurs initiales.

Cette dépendance est modélisée par une arête orientée $e = (i, j)$ de i vers le nœud j . Cela peut se noter : $[e = (i, j) \in E] \Leftrightarrow [\delta_i \Rightarrow \delta_j]$. Entre deux nœuds i et j , il peut y avoir deux arêtes $e = (i, j)$ et $e' = (j, i)$ se rapportant à une dépendance bidirectionnelle entre eux.

En comparant avec les résultats de la troisième étape (l'identification préliminaire après la simulation libre), pour toute dépendance entre un couple de paramètres P_i et P_j il y a deux possibilités :

- La dépendance existe toujours, ($v_{i,j} \neq 0$).
- La dépendance a disparu. Selon le protocole de la simulation contrôlée, en modifiant la valeur de P_i tout en conservant les valeurs de tous les autres prédécesseurs fixées, la valeur du paramètre P_j ne change plus.

La disparition d'un lien de dépendance identifié précédemment à l'étape 3 signifie la non-existence de dépendance dans notre approche. Toutefois, cette absence de dépendance n'est pas établie formellement mais peut exister indirectement dans d'autres dépendances existantes.

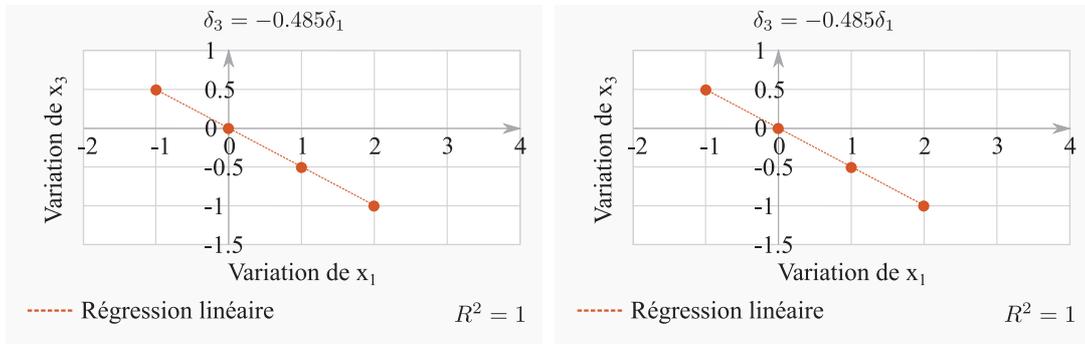
Cette dernière étape utilise les résultats de la différentielle totale des paramètres pour construire le graphe de dépendance qui relie uniquement les paramètres influents à chaque paramètre. En comparant ce graphe avec celui obtenu dans l'étape 3, quelques arcs ne sont plus présents, menant donc à un modèle de dépendance du système plus simple.

Il est possible d'associer à la différentielle totale, calculée pour chaque paramètre présentant une agrégation de plusieurs prédécesseurs, une erreur relative. Cette erreur relative peut être un signe d'existence de dépendance non explicitée par la simulation contrôlée. Elle montre par conséquent l'erreur commise en procédant par une approximation via la différentielle totale comme somme des dérivées partielles mono-variables.

Cela peut être illustré par l'exemple précédant de la Figure 3.6. Supposons que les résultats de la simulation libre soient sauvegardés dans la matrice D , et que la dépendance entre deux couples de paramètres, (P_1, P_2) et (P_1, P_3) , soit également identifiée à l'aide de l'analyse de régression par les fonctions $f_{1,2}$ et $f_{1,3}$, voir Figure 3.9a et Figure 3.9b.

Nous désirons déterminer l'erreur relative entre (i) les variations du paramètre P_2 selon les variations de P_1 et P_3 simultanément (*i.e.* les résultats de la simulation libre) et (ii) l'application de la différentielle totale du paramètre P_2 selon les variations de P_1 et P_3 , pris un par un (*i.e.* par la simulation contrôlée).

Simulation libre (variation exacte). Calculons tout d'abord la pente des tangentes à la courbe des fonction $f_{1,3}$ et $f_{1,2}$ au voisinage de la valeur initiale de P_1 représenté par $x_1 \approx x_1^0$:



(a) $f_{1,2}$ (Simulation libre) (b) $f_{1,3}$ (Simulation libre)
 FIGURE 3.9 – Courbes de dépendances des variations par simulation libre

$$\alpha = \left(\frac{dx_3}{dx_1} \right)_{x_1 \approx x_1^0} \quad (3.20)$$

$$\beta = \left(\frac{dx_2}{dx_1} \right)_{x_1 \approx x_1^0} \quad (3.21)$$

Dans notre cas, $\alpha = -0,485$ et $\beta = 0,5$.

Simulation contrôlée (approximation). Nous pouvons écrire la différentielle totale de P_2 de la manière suivante :

$$dx_2 = \left(\frac{\partial x_2}{\partial x_1} \right)_{\substack{x_1 \approx x_1^0 \\ x_3 = x_3^0}} dx_1 + \left(\frac{\partial x_2}{\partial x_3} \right)_{\substack{x_1 = x_1^0 \\ x_3 \approx x_3^0}} dx_3 \quad (3.22)$$

Selon l'équation 3.20, appliquée au voisinage de la valeur initiale du paramètre P_1 , tel que $x_1 \approx x_1^0$, on peut écrire :

$$dx_3 = \left(\frac{dx_3}{dx_1} \right)_{x_1 \approx x_1^0} dx_1 = \alpha dx_1 \quad (3.23)$$

Par conséquent, l'équation de la différentielle totale de x_2 peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} dx_2 &= \left(\frac{\partial x_2}{\partial x_1} \right)_{\substack{x_1 \approx x_1^0 \\ x_3 = x_3^0}} dx_1 + \alpha \left(\frac{\partial x_2}{\partial x_3} \right)_{\substack{x_1 = x_1^0 \\ x_3 \approx x_3^0}} dx_1 \\ &= \left(\left(\frac{\partial x_2}{\partial x_1} \right)_{\substack{x_1 \approx x_1^0 \\ x_3 = x_3^0}} + \alpha \left(\frac{\partial x_2}{\partial x_3} \right)_{\substack{x_1 = x_1^0 \\ x_3 \approx x_3^0}} \right) dx_1 = \hat{\beta} dx_1 \end{aligned} \quad (3.24)$$

Donc, pour valider l'utilisation de la dérivée totale, il faut vérifier si $\beta = \hat{\beta}$, ou sinon calculer leurs différences, où :

$$\hat{\beta} = \left(\frac{\partial x_2}{\partial x_1} \right)_{\substack{x_1 \approx x_1^0 \\ x_3 = x_3^0}} + \alpha \left(\frac{\partial x_2}{\partial x_3} \right)_{\substack{x_1 = x_1^0 \\ x_3 \approx x_3^0}} \quad (3.25)$$

Enfin, l'erreur relative, utilisée pour comparer les valeurs de β et $\hat{\beta}$, peut s'exprimer par :

$$\delta_\beta = \frac{\hat{\beta} - \beta}{|\beta|} \quad (3.26)$$

Pour une variation $\delta_3 = 0,01$ supposée infinitésimale (extrêmement petite), nous obtenons $\hat{\beta} = 0,459$ et $\delta_\beta = -8,2\%$. Cette dernière formule permet alors de vérifier l'erreur commise en raison de l'hypothèse principale utilisée dans l'approche qui porte sur le "voisinage". En effet, la différentielle totale admet l'hypothèse que les variations doivent être infinitésimales autour des valeurs initiales, ce qui n'est pas le cas dans notre approche. Les variations appliquées à chaque paramètre ne peuvent pas être considérées comme infinitésimalement petites. Par contre, on voit que ces approximations ne modifient pas trop la variation totale des paramètres.

3.5 Analyse des données et caractérisation des dépendances

Les résultats collectés dans l'étape 6 de l'approche d'identification proposée, sont représentés sous deux formes différentes à l'aide de deux types de structure de données : des matrices et des graphes. Quatre matrices ont été présentées : les matrices qualitative S, quantitative Q, binaire B et fonctionnelle F. Chacune de ces matrices peut être utilisée pour un objectif bien déterminé.

La matrice binaire B, indispensable dans notre approche d'identification pour la détermination des prédécesseurs de chacun des nœuds, permet également de fournir une idée sur le cheminement des changements à travers les dépendances. Donc, non seulement les conséquences directes d'un changement peuvent être identifiées, mais, de plus, les conséquences indirectes peuvent être déduites. Par exemple, si $b_{1,2} = b_{2,3} = 1$, en plus des deux dépendances directes entre les paramètres (P_1, P_2) et (P_2, P_3), une dépendance (ou un chemin en termes de propagation) indirecte entre les paramètres (P_1, P_3) existe.

La matrice qualitative S, comme son nom l'indique, est utilisée pour réaliser des analyses qualitatives. Par exemple, elle est utilisée pour évaluer le sens de changement sur un paramètre après avoir changé la valeur d'un autre. Elle peut même être utile pour détecter la stabilité des cycles de propagation. En effet, chaque graphe de dépendance comporte des chemins de propagation (une succession de nœuds reliés entre eux avec des arcs). Ces chemins de propagation peuvent présenter parfois des cycles. Un cycle est défini comme étant un chemin partant d'un nœud passant par d'autres nœuds (ou pas) et revenant au même nœud de départ. Grâce à cette matrice, on peut distinguer s'il s'agit d'un cycle stable ou un cycle infini qui tend vers une limite infinie (positivement ou négativement).

La Figure 3.10 présente ces deux types de cycle. A droite, un cas d'un cycle stable qui tend vers une limite finie puisqu'on a une dépendance qualitative de 1 vers 2 opposée à celle de 2 vers 1. Par contre, le cycle situé à gauche reflète un cycle qui augmente infiniment puisque ses deux dépendances qualitatives présentent le même signe de variations.

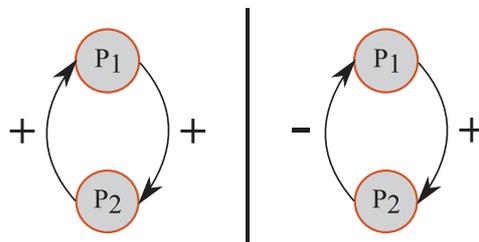


FIGURE 3.10 – Cycles de dépendance qualitative

Contrairement aux deux premières matrices présentées binaire B et qualitative S, les deux autres matrices quantitatives Q et fonctionnelle F sont capables de quantifier l'impact d'un changement de la valeur d'un paramètre sur un autre.

Dans la littérature, comme cela a été précisé dans le chapitre précédent, la matrice quantitative a été introduite et utilisée par plusieurs auteurs. Dans le cas d'une dépendance linéaire entre deux paramètres, la matrice Q retourne la valeur du coefficient direc-

teur de la droite de régression linéaire. Par contre, pour le cas d'une dépendance polynomiale, la matrice Q retourne la pente de la tangente à la courbe passant par le point initial. La matrice de dépendance fonctionnelle, quant à elle, ne dépend pas du point initial et caractérise la relation entre deux paramètres, obtenue par régression sur un ensemble de points de données.

Supposons un exemple où nous avons une dépendance entre deux paramètres notées P_1 et P_2 (de valeurs x_1 et x_2 respectivement). Le nuage de points qui décrit la variation du deuxième paramètre à cause de la variation de la valeur du premier est représenté sur la Figure 3.11.

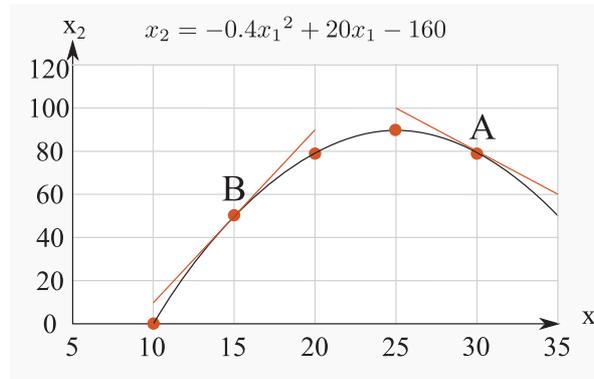


FIGURE 3.11 – Dépendance polynomiale et caractérisation

Les coordonnées du point A(30;80) représentent respectivement les valeurs initiales des deux paramètres P_1 et P_2 . La caractérisation quantitative nous donne une valeur négative puisque la courbe est décroissante au voisinage de ce point initial (pente négative de la tangente passant par le point A).

Si on choisit un point initial B(15;50), la pente sera positive et la courbe sera croissante au voisinage de ce point. La matrice quantitative (tout comme la matrice qualitative) dépend du point initial choisi. Ce qui n'est pas le cas de la matrice fonctionnelle qui dépend uniquement de la variation de la valeur du paramètre instigateur. Cela démontre l'intérêt d'utilisation de la matrice F capable de représenter les variations relatives de deux paramètres de manière beaucoup plus précise.

Le graphe de dépendance établi à la sixième étape de l'approche d'identification des dépendances est un graphe orienté. Le choix d'un graphe orienté est justifié par le fait que les dépendances ne sont pas à double sens. Autrement dit, qu'on peut avoir une dépendance d'un paramètre P_1 vers un deuxième P_2 sans avoir une dépendance dans le sens contraire. Cela peut être remarqué aussi par l'absence de symétrie des matrices.

Dans un graphe de dépendance, les nœuds peuvent être classés selon le nombre d'arcs entrants et sortants en deux types : nœuds dominants et nœuds dominés. Si le nombre d'arcs entrants est supérieur que celui d'arcs sortants, on dit que le nœud est dominé. Dans le cas contraire, où le nombre d'arcs sortant est supérieur de celui d'arcs entrant, le nœud est appelé dominant. Voici un exemple de graphe de dépendance, présenté dans la Figure 3.12.

Dans cet exemple, le nœud P_1 est un nœud dominant parce que chaque modification apportée à la valeur de ce paramètre provoque des changements à nombreux autres nœuds ($P_i, \forall i \in \{2, \dots, 6\}$). Cependant, le nœud P_7 est dominé puisqu'il peut être affecté à peu près avec tous les autres nœuds.

Généralement, plus le nombre d'arcs et de nœuds augmente, plus le graphe devient difficile à interpréter. Des méthodes de filtrage de graphe peuvent être considérées afin de permettre, par exemple, de représenter uniquement les liens significatifs de dépendance (en utilisant des techniques de seuil).

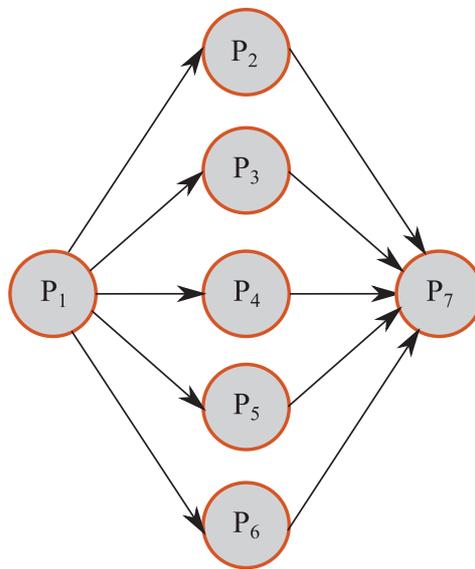


FIGURE 3.12 – Exemple de graphe de dépendance

Les arcs du graphe de dépendance peuvent être classés à leur tour en dépendance simple et en dépendance double. La dépendance est dite simple s'il n'existe qu'un seul arc (une arrête orientée) reliant deux paramètres. Par contre, la dépendance est dite double si les deux arcs de sens contraires reliant les deux paramètres coexistent en même temps.

3.6 Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre est de proposer une nouvelle approche pour l'identification des dépendances entre les paramètres d'un système/produit dans un premier temps et la caractérisation des impacts de changements. Cette approche repose sur une solide théorie mathématique qui permet d'obtenir une approximation de la variation d'un paramètre connaissant toutes les variations individuelles des autres paramètres dont il dépend (ses prédécesseurs). L'identification des dépendances internes d'un système est considérée comme étant une phase cruciale pour l'évaluation d'une demande de changement et de son impact sur le système en totalité.

Les principales contributions de cette approche sont :

- La définition fonctionnelle des liens de dépendance. La caractérisation classique des dépendances est faite dans la littérature soit qualitativement soit quantitativement. L'application de l'approche sur un produit en caractérisant les dépendances sous forme de fonctions polynomiales, permet aux concepteurs de définir de façon formelle les variations relatives. La propagation de changements est donc plus fiable et peut être faite en combinant la précision mathématiquement prouvée et la rapidité des approches a posteriori. La dépendance fonctionnelle procure une capacité d'analyse supérieure.
- La préparation d'abaques (outils servant à calculer) des variations des paramètres les plus critiques. On se basant sur une étude structurale du graphe de dépendance, il est possible d'identifier les paramètres les plus critiques du produit. Ce sont ces paramètres qui influencent de nombreux autres paramètres et aussi ceux qui sont influencés par de nombreux autres paramètres (selon le degré entrant et sortant de chaque nœud). Pour ces paramètres critiques, il est possible de préparer les abaques basés sur la variation potentielle de leurs paramètres dépendants pour aider les concepteurs dans le choix des variations de la cible.

De ce fait, le chapitre présent a répondu aux questions **Q. 1** et **Q. 2** posées précédemment (au niveau de la formulation du problème d'identification) sur la caractérisation des quantités $\theta_{i,j}$ reliant chaque couple de paramètres.

Une fois les dépendances identifiées et le changement et caractérisé, l'approche théorique présentée ici permet d'alimenter la phase d'étude de la propagation d'un changement tout au long du système, avec une caractérisation des dépendances plus précise et indépendante du point initial de mesure de cette dépendance.

Chapitre 4

Propagation des changements

« Shallow men believe in luck or in circumstance. Strong men believe in cause and effect »

Ralph Waldo Emerson

Sommaire

4.1 Introduction	57
4.2 Définitions liées à la propagation	59
4.2.1 Nœud instigateur de propagation	59
4.2.2 Nœud d'arrêt de propagation	59
4.2.3 Nœud intermédiaire	59
4.2.4 Chemin de propagation	59
4.2.5 Arbre de propagation	59
4.2.6 Couche de propagation	59
4.3 Formulation du problème de propagation	60
4.4 Principes de la propagation des changements	60
4.4.1 Structure de dépendance en série	61
4.4.2 Structure de dépendance en fourche	62
4.5 Proposition de méthode pour la propagation des changements	63
4.5.1 La méthode Layer propagation (par couches)	63
4.5.2 La méthode Path propagation (par chemins)	65
4.6 Application des deux méthodes sur un cas illustratif	67
4.6.1 Méthode de propagation par couches	67
4.6.2 Méthode de propagation par chemin	69
4.6.3 Comparaison des deux méthodes	70
4.7 Exploitation de la propagation du changement pour la conception	73
4.8 Conclusion	74

4.1 Introduction

Une compréhension approfondie du mécanisme de propagation est importante pour la gestion efficace des demandes de changements lors de la re-conception d'un produit. Elle permet au concepteur d'avoir une connaissance précise de la connectivité de celui-ci et de réduire sa sensibilité à de futurs changements.

Similairement à d'autres travaux comme [ECKERT et al., 2004; GIFFIN et al., 2009], nous définissons la propagation d'un changement comme étant le processus ou le mécanisme par lequel un changement sur un élément (paramètre ou composant) d'un produit existant aboutit à un ou plusieurs changements sur les autres éléments par l'intermédiaire des liens de dépendances. Chaque propagation peut être décrite par un impact qui est défini par l'effet de changement des valeurs des éléments du produit.

En plus de la modification de valeurs des autres paramètres du produit, un changement sur un paramètre du produit peut avoir d'autres conséquences sur les performances du produit :

- Sur le prix du produit (par son coût de réalisation)
- Sur l'aspect esthétique du produit (Design satisfaisant ou pas aux yeux du client après un changement de forme ou de couleur)
- Sur la qualité du produit (Avoir une meilleure qualité sonore par l'introduction de la technologie "BeatsAudio™" sur un smartphone)
- Sur les fonctions principales et/ou secondaires du produit (comme assurer ou pas la cyclabilité d'un vélo)

D'un point de vue projet, le changement peut également conduire à d'autres effets comme l'augmentation du temps de réalisation.

De manière plus formelle, l'effet d'un changement C survenu sur un élément E peut être caractérisé en termes d'un ensemble d'attributs A_i tels que le coût engendré, le poids, la couleur, le délai d'intégration, les changements engendrés dans des éléments dépendants de E, *etc.* Chacun de ces attributs peut être évalué selon une métrique donnée (coût en Euro, délai en jours d'ingénierie nécessaires par exemple). Nous rappelons donc que l'"effet d'un changement" est représenté par un vecteur d'attributs valués obtenu à chaque état stable du modèle de produit.

La gestion de changement est considérée donc comme l'ensemble de processus décisionnels qui cherchent à minimiser l'impact d'intégration d'un changement initial et tous ses changements descendants. Le phénomène de propagation se réalise via les chemins du graphe de dépendance. De manière pratique, la mise en place d'une gestion de changement efficace se résumera à (i) l'identification des éléments du modèle contrôlables, (ii) la détermination de décisions permettant de privilégier certains chemins (ou canaux) de propagation au détriment des autres dont les impacts sont plus importants.

De manière pragmatique, il sera possible d'exécuter une action parmi celles proposées ci-dessous pour gérer la propagation de changements :

- de circonscrire le sous-espace des éléments impactés dans un produit ou de système suite à l'intégration d'un changement initial,
- de limiter voire d'annuler les effets d'un changement,
- de choisir les chemins optimaux (au sens de l'impact global) de propagation. Au regard des définitions ci-dessous, il est aisé de voir que si la gestion des changements est peu efficace, elle peut aggraver les impacts de la propagation.

A titre d'exemple, dans le graphe ci-dessous, si on suppose qu'un changement initial est à intégrer sur l'élément A, son effet peut être propagé via plusieurs chemins vers les différents nœuds et en particulier le nœud I. Si de manière schématique la taille de chaque nœud représente l'impact d'un changement sur les nœuds, on peut voir qu'il y a des nœuds

dont l'impact peut être plus important que les autres : les nœuds E et F. Il est par conséquent important de connaître a priori ces effets et de pouvoir stopper la propagation en agissant sur le nœud C qui ouvre le chemin de propagation vers les nœuds E et F. Les concepteurs ont par conséquent tout intérêt à agir sur le nœud C afin de minimiser l'impact atteignant le nœud I.

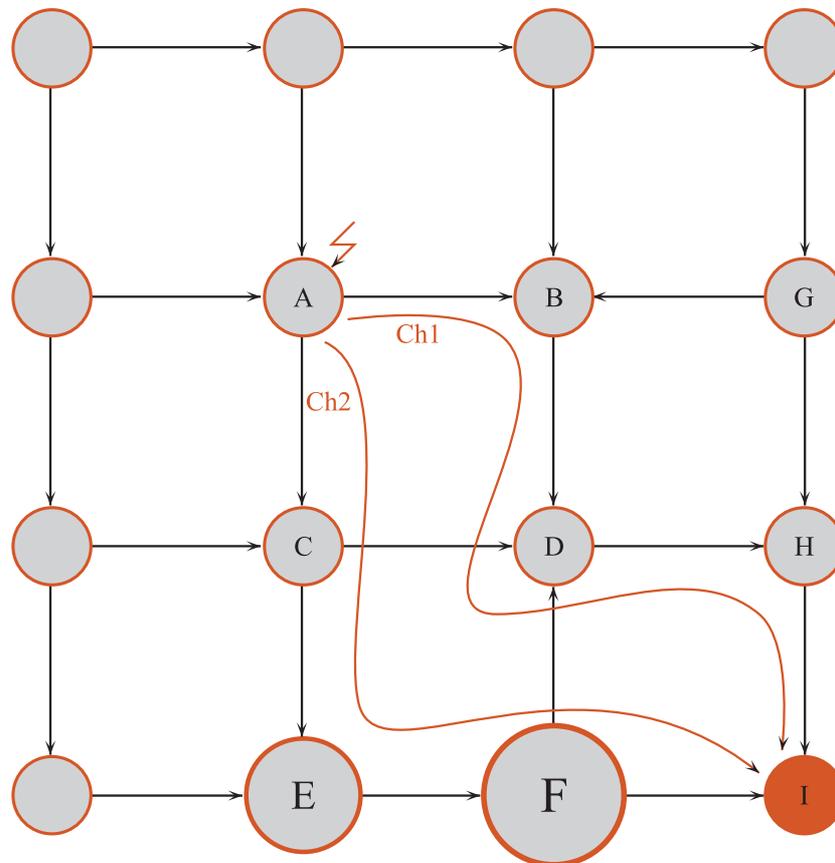


FIGURE 4.1 – Un graphe de dépendance

L'analyse de la propagation de changements doit donc permettre de différencier les chemins de propagation contribuant à de forts impacts ($\{A, C, E, F, I\}$ et $\{A, B, C, E, F, D, H, I\}$) de ceux contribuant à un impact négligeable ($\{A, B, D, H, I\}$). Il est aisé de comprendre que devant la complexité d'un produit réel, les concepteurs peuvent avoir des difficultés à appréhender ce mécanisme de propagation et le fait qu'un paramètre modifié puisse affecter les autres qualitativement ou quantitativement.

Après avoir réalisé l'identification et la caractérisation des dépendances entre les éléments d'un système en phase de re-conception, les questions naturelles qui se posent alors sont les suivantes : comment les changements se propagent entre les composants du système, comment peut-on évaluer l'impact de la propagation d'un changement et comment peut-on calculer les nouvelles valeurs des éléments du système après propagation et quels indicateurs peuvent être définis ou utilisés pour l'évaluation ?

L'objectif de ce chapitre est de répondre à ces questions. En préambule, la définition de quelques notions liées à la propagation de changements et la présentation de la problématique de propagation seront fournies pour permettre la compréhension de la suite du chapitre. Deux méthodes pour la résolution du problème de propagation et le calcul d'impact de changements seront présentées. Ces deux méthodes seront appliquées et comparées sur un cas explicatif.

Nous clôturons ce chapitre par la présentation des résultats obtenus par l'analyse de propagation de changements et l'exploitation de ces résultats pour la conception et la re-conception du système étudié.

4.2 Définitions liées à la propagation

Nous définissons la propagation de changements comme "la progression en cascade (effet domino) et directionnelle des changements ou modifications au sein d'un système via les liens de dépendances entre les éléments du système". Dans cette section, nous donnons les définitions utilisées pour les notions de chemin et couche de propagation, ainsi que les appellations relatives aux différents rôles des nœuds représentatifs des éléments d'un système. Toutes ces définitions sont en relation avec le graphe de dépendance défini précédemment dans le chapitre 3.

4.2.1 Nœud instigateur de propagation

Le nœud instigateur est un nœud du graphe de dépendance qui représente l'élément instigateur du changement (le nœud A dans le graphe de la Figure 4.1), pour lequel un changement de valeur est imposé et par lequel débute le processus de propagation.

4.2.2 Nœud d'arrêt de propagation

Un nœud d'arrêt de propagation appelé aussi une feuille est un nœud qui n'a pas de successeur dans le graphe de dépendance. N'ayant plus de canaux de propagation disponible, la propagation s'arrête. Le nœud I du graphe de la figure 4.1 est un nœud d'arrêt.

4.2.3 Nœud intermédiaire

Un nœud intermédiaire est un nœud du graphe de dépendance qui participe à la propagation sans être un nœud instigateur ou un nœud d'arrêt de propagation (les nœuds B, C, D, E, F et H).

4.2.4 Chemin de propagation

Un chemin de propagation est une succession d'arcs (ou chemin) dans le graphe de dépendance d'un système telle que l'extrémité de chacun est l'origine du suivant (sauf le dernier). Ch_1 et Ch_2 sont deux chemins de ce même graphe. Un chemin est caractérisé par sa longueur : le nombre d'arcs qui le composent. Par exemple la longueur du chemin Ch_1 est de 4. Si l'origine et l'extrémité du chemin de propagation coïncident, il s'agit d'un circuit.

4.2.5 Arbre de propagation

Un arbre de propagation de racine N_i est définie par un graphe orienté non connexe et acyclique qui contient tous les chemins de propagation partant du nœud instigateur de propagation N_i jusqu'à l'un des nœuds d'arrêt de propagation. Contrairement aux notions d'arbre et d'arborescence en théorie de graphe, cet arbre de propagation est un graphe orienté dans lequel on peut avoir l'apparition d'un nœud plusieurs fois (voir Figure 4.2).

4.2.6 Couche de propagation

Une couche de propagation est définie par l'ensemble de nœuds dans le graphe de dépendance qui partagent la même distance au nœud instigateur. La distance d'un nœud au nœud instigateur correspond à la longueur du chemin le plus long partant du nœud instigateur et arrivant au nœud considéré. Les différentes couches qu'on peut définir pour l'arbre de propagation du nœud A sont alors composées des nœuds suivants : $Couche_1 = \{B, C\}$, $Couche_2 = \{E\}$, $Couche_3 = \{F\}$, $Couche_4 = \{D\}$, $Couche_5 = \{H\}$ et $Couche_6 = \{I\}$.

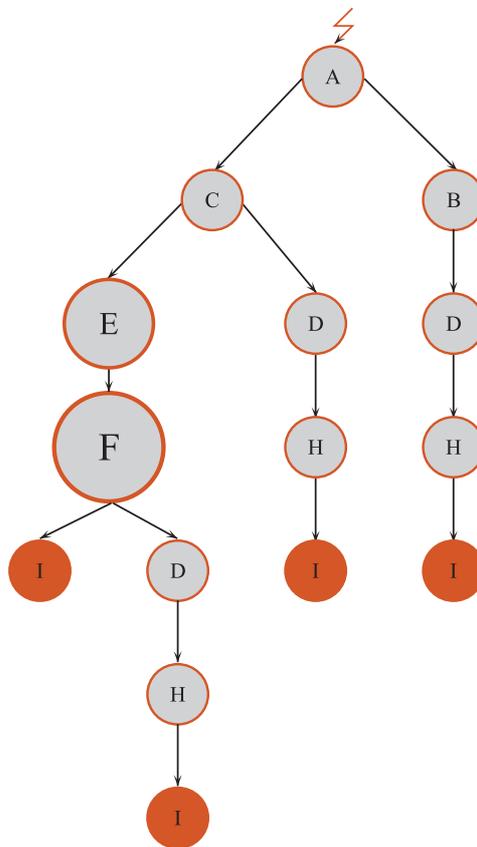


FIGURE 4.2 – Arbre de propagation d'un changement survenu sur le nœud A

4.3 Formulation du problème de propagation

Étant donné un graphe de dépendance, les nœuds représentent les paramètres du système tandis que les arcs qui les relient ensemble modélisent leurs dépendances, identifiées précédemment dans le chapitre 3. Toutes les valeurs initiales des attributs des nœuds sont connues.

La décision et le choix de faire varier un paramètre instigateur déclenchent le processus de propagation. La propagation de ce changement résulte en une modification (possible) des valeurs des attributs des autres nœuds. Dans ce contexte, deux séries de questions peuvent être posées :

- i. Comment ce changement peut-il se propager tout au long du graphe de dépendance? Quels sont les chemins de propagations? Quels sont les nœuds qui vont participer à la propagation?
- ii. Comment caractériser les nouvelles valeurs des paramètres après propagation? Quels indicateurs peuvent être définis pour évaluer l'impact de la propagation de changements?

Dans notre approche développée dans la thèse, nous ne considérons qu'un seul attribut associé à chaque nœud. Il s'agit de sa valeur. Toutefois, le cadre général défini ici permet dans un autre travail de recherche d'élargir la notion de propagation et le calcul d'impact multi-attributs. Dans ce qui suit, nous cherchons à répondre à ces questions.

4.4 Principes de la propagation des changements

La propagation dans un graphe de dépendance se ramène alors à parcourir un graphe. En théorie de graphe, il existe deux algorithmes pour parcourir un graphe; l'algorithme de

parcours en largeur (ou **Breadth First Search (BFS)**) et l'algorithme de parcours en profondeur **Depth First Search (DFS)**).

L'algorithme de parcours en largeur explore les nœuds en fonction de leur distance (au sens classique du terme) du nœud instigateur (de départ). On commence par explorer le nœud instigateur, puis ses successeurs, puis les successeurs non explorés des successeurs, et ainsi de suite.

L'algorithme de parcours en profondeur explore tous les nœuds le long d'une branche (ou chemin) jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de nouvelle possibilité d'exploration et retourne ensuite à une nouvelle branche possible.

L'objectif est donc d'adapter ces deux démarches de parcours de graphes à notre système d'équations (composé par les fonctions polynomiales identifiées et des équations de différentielle totale en cas d'agrégation) identifié lors de la phase d'identification des dépendances présentés au chapitre 3.

En se basant sur ces deux algorithmes, nous proposons deux approches de propagation pour calculer les nouvelles valeurs des nœuds affectés par un changement fait sur un nœud instigateur : la méthode de propagation par couche et la méthode de propagation par chemin.

Dans ces deux approches, les modifications sont propagées le long des liens de dépendance, les auto-dépendances ne sont pas considérées et les circuits sont éliminés. Dans la théorie des graphes, une auto-dépendance correspond à une boucle, *i.e.* un chemin de longueur unitaire liant un nœud à lui-même (c'est-à-dire, $e = (i, i) \in E$). Un chemin orienté est un ensemble ordonné de nœuds, noté par $\Gamma = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$, dans lequel chaque couple de nœuds successifs i_k et i_{k+1} , pour un entier $k < n$ donné, est relié par un arc (i_k, i_{k+1}) , c'est-à-dire, que chaque nœud dans le chemin possède au plus un prédécesseur et un successeur.

Lors du calcul des nouvelles valeurs des paramètres à travers le graphe de dépendance, nous avons besoin de deux types de structures de base, appelées aussi opérateurs d'agrégation, pour :

- Structure de dépendance en série. Elle permet d'exprimer la valeur d'un paramètre j en fonction des autres paramètres appartenant à un même chemin de propagation via l'application d'un opérateur d'agrégation en série défini ci-après. L'opérateur d'agrégation est alors appliqué pour déterminer la nouvelle valeur du nœud F connaissant la valeur du nœud E (*cf.* Figure 4.2).
- Structure de dépendances en fourche. Elle exprime la valeur d'un paramètre (nœud k) en fonction de ses prédécesseurs. Les effets de plusieurs chemins convergents à un même nœud sont alors agrégés à travers un opérateur d'agrégation convergente. On cherchera donc à déterminer la nouvelle valeur du nœud D connaissant les valeurs des nœuds B, C et F de l'arbre de la figure 4.2.

4.4.1 Structure de dépendance en série



FIGURE 4.3 – Structure de dépendance en série

Une structure de dépendance en série correspond à une succession d'arcs formant un chemin. Étant donnés deux arcs $e_1 = (i, j)$ et $e_2 = (j, k)$ reliant, respectivement, les nœuds i à j et j à k , le calcul de la valeur \hat{x}_k du paramètre k peut-être effectué en fonction d'une variation survenue au nœud i et en passant par le nœud j via une relation de transitivité

(voir Figure 4.3). Nous définissons alors l'opérateur d'agrégation série, noté par le symbole \otimes tel que :

$$\hat{x}_k = x_i \otimes x_j \quad \text{si et seulement si} \quad [(i, j) \wedge (j, k)] \quad (4.1)$$

où \wedge réfère à la succession en série des arcs.

Dans notre cas, la composition fonctionnelle peut être utilisée comme étant un opérateur d'agrégation en série.

Étant donnés deux arcs $e_1 = (i, j)$ et $e_2 = (j, k)$ reliant, respectivement, les nœuds i à j et j à k , associés aux dépendances fonctionnelles de fonctions respectives $f_{i,j}$ et $f_{j,k}$, le calcul de la valeur \hat{x}_k du paramètre k est effectué en utilisant la composition algébrique de fonctions :

$$\hat{x}_k = x_i \otimes x_j \quad \text{signifie} \quad \delta_k = f_{j,k}(f_{i,j}(\delta_j)) = f_{j,k} \circ f_{i,j}(\delta_j) \quad (4.2)$$

Donc

$$\hat{x}_k = x_k^0 + \delta_k = x_k^0 + f_{j,k}(f_{i,j}(\delta_j)) \quad (4.3)$$

Cette équation peut être aussi généralisée pour m nœuds d'indices $(1, 2, \dots, m)$, prédécesseurs de k , en série :

$$\hat{x}_k = x_1 \otimes x_2 \otimes \dots \otimes x_m \quad \text{signifie} \quad \delta_k = f_{m,k}(f_{m-1,m}(\dots f_{1,2}(\delta_1))) \quad (4.4)$$

Et

$$\hat{x}_k = x_k^0 + \delta_k = x_k^0 + f_{m,k}(f_{m-1,m}(\dots f_{1,2}(\delta_1))) \quad (4.5)$$

4.4.2 Structure de dépendance en fourche

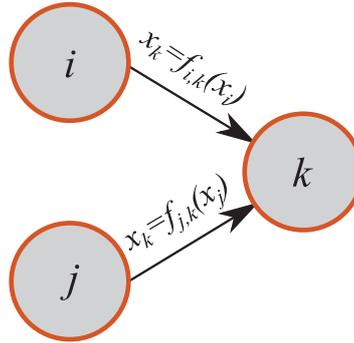


FIGURE 4.4 – Structure de dépendance en fourche

Une structure en fourche représente plusieurs arcs ayant la même extrémité de destination. Étant donnés deux arcs $e_1 = (i, k)$ et $e_2 = (j, k)$ reliant, respectivement, les nœuds i à k et j à k (voir Figure 4.4), le calcul de la valeur \hat{x}_k du paramètre k est effectué en utilisant un opérateur d'agrégation convergente, noté par le symbole \oplus tel que :

$$\hat{x}_k = x_i \oplus x_j \quad \text{si et seulement si} \quad [(i, k) \vee (j, k)] \quad (4.6)$$

où \vee réfère à la structure convergente des arcs vers le nœud k .

Cet opérateur d'agrégation convergente peut être défini comme étant entre autres la fonction moyenne, le maximum, le minimum ou bien la différentielle totale.

- En utilisant la différentielle totale comme opérateur d'agrégation convergente, notée par le symbole \oplus , on peut écrire :

$$\hat{x}_k = x_i \oplus x_j \quad \text{signifie} \quad df_k(x_i, x_j) = \left(\frac{\partial f_k}{\partial x_i} \right) dx_i + \left(\frac{\partial f_k}{\partial x_j} \right) dx_j$$

$$\text{So} \quad \hat{x}_k = x_k^0 + df_k(x_i, x_j) = x_k^0 + \left(\frac{\partial f_k}{\partial x_i} \right) dx_i + \left(\frac{\partial f_k}{\partial x_j} \right) dx_j \quad (4.7)$$

Cette équation peut être aussi généralisée pour m nœuds d'indices $(1, 2, \dots, m)$ en parallèle :

$$x_k = x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_m \quad \text{signifie} \quad df_k(x_1, x_2, \dots, x_m) = \left(\frac{\partial f_k}{\partial x_1}\right) dx_1 + \left(\frac{\partial f_k}{\partial x_2}\right) dx_2 + \dots + \left(\frac{\partial f_k}{\partial x_m}\right) dx_m$$

Donc $\hat{x}_k = x_k^0 + \left(\frac{\partial f_k}{\partial x_1}\right) dx_1 + \left(\frac{\partial f_k}{\partial x_2}\right) dx_2 + \dots + \left(\frac{\partial f_k}{\partial x_m}\right) dx_m$ (4.8)

- En utilisant la fonction maximum comme opérateur d'agrégation convergente notée par le symbole \oplus :

$$\hat{x}_k = x_i \oplus x_j \quad \text{signifie} \quad \hat{x}_k = \max(x_i^0 + f_{i,k}(\delta_i); x_j^0 + f_{j,k}(\delta_j)) \quad (4.9)$$

Cette équation peut être aussi généralisée pour m nœuds d'indices $(1, 2, \dots, m)$ en parallèle :

$$\hat{x}_k = \max_{1 \leq i \leq m} (x_i^0 + f_{i,k}(\delta_i)) \quad (4.10)$$

- En utilisant la fonction minimum comme opérateur d'agrégation convergente notée par le symbole \oplus :

$$\hat{x}_k = x_i \oplus x_j \quad \text{signifie} \quad \hat{x}_k = \min(x_i^0 + f_{i,k}(\delta_i); x_j^0 + f_{j,k}(\delta_j)) \quad (4.11)$$

Cette équation peut être aussi généralisée pour m nœuds d'indices $(1, 2, \dots, m)$ en parallèle :

$$\hat{x}_k = \min_{1 \leq i \leq m} (x_i^0 + f_{i,k}(\delta_i)) \quad (4.12)$$

- En utilisant la fonction moyenne comme opérateur d'agrégation convergente notée par le symbole \oplus :

$$\hat{x}_k = x_i \oplus x_j \quad \text{signifie} \quad \hat{x}_k = \frac{x_i^0 + f_{i,k}(\delta_i) + x_j^0 + f_{j,k}(\delta_j)}{2} \quad (4.13)$$

Cette équation peut être aussi généralisée pour m nœuds d'indices $(1, 2, \dots, m)$ en parallèle :

$$\hat{x}_k = \sum_{i=1}^m \frac{(x_i^0 + f_{i,k}(\delta_i))}{m} \quad (4.14)$$

Dans la section suivante, nous présentons deux méthodes de propagation des changements. Pour chaque méthode, nous spécifierons ses différents opérateurs d'agrégation utilisés lors du calcul des nouvelles valeurs des paramètres après propagation.

4.5 Proposition de méthode pour la propagation des changements

4.5.1 La méthode Layer propagation (par couches)

Nous proposons une méthode de propagation par couche en nous basant sur l'algorithme de parcours en largeur. Une couche est constituée de nœuds ayant tous la même distance du nœud instigateur. Toutefois, comme il peut être vu dans la figure 4.2, le nœud D est à distance de 2 (pour les chemins $\langle A, B, D \rangle$ et $\langle A, C, D \rangle$) et 4 (le chemin $\langle A, C, E, F \rangle$). Il n'est donc pas possible de calculer sa nouvelle valeur via une agrégation convergente que lorsque les influences en provenance des trois chemins possibles sont disponibles. Par conséquent, le nœud D va appartenir à la couche de distance 4 du nœud A.

Ce principe est utilisé pour déterminer toutes les couches dans l'ordre croissant de leur distance par rapport au nœud instigateur.

La distance d'un nœud par rapport à un nœud instigateur est définie comme la longueur du chemin orienté le plus long au nœud instigateur. Les nœuds ayant la même distance c du nœud instigateur forment une couche, notée par L_c . Le principe de la méthode de propagation par couches est d'effectuer le calcul des nouvelles valeurs des paramètres à l'aide des dépendances fonctionnelles (les fonctions polynomiales $f_{i,j}$) et les opérateurs d'agrégation en série et convergente, en naviguant sur les couches par distance croissante. Donc, une variation d'un nœud δ_i peut être calculée si et seulement si les nouvelles valeurs de tous ses nœuds prédécesseurs (et leurs variations de changements) ont été calculées préalablement, (Figure 4.5b).

Dans la méthode de propagation par couches, nous utilisons la composition fonctionnelle comme l'opérateur d'agrégation en série pour calculer la nouvelle valeur d'un nœud de la couche c s'il possède un unique prédécesseur. Ce prédécesseur peut appartenir à n'importe quelle couche $i, \forall i \in 1 \dots c - 1$. Prenons l'exemple de la Figure 4.5a.

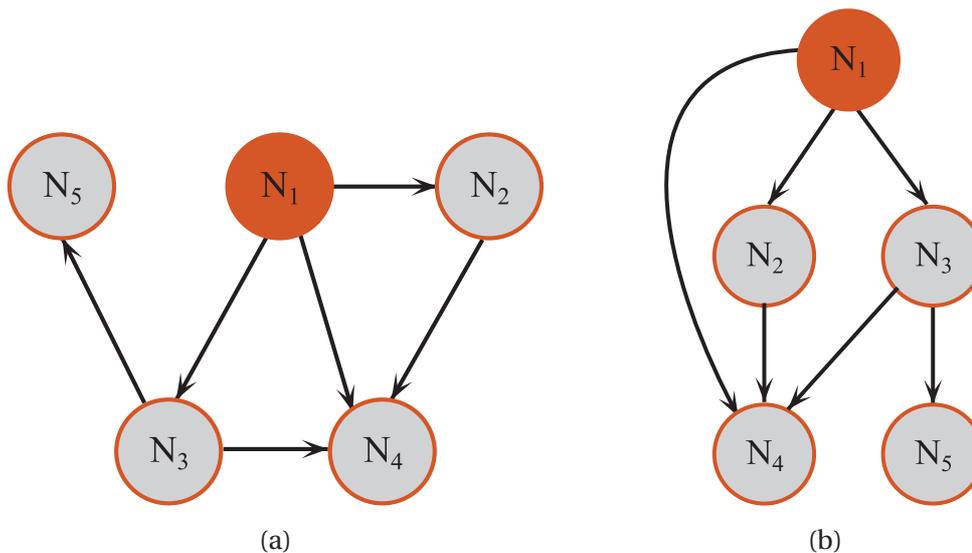


FIGURE 4.5 – Graphe de propagation des changements

Nous choisissons N_1 comme nœud instigateur. L'objectif est de calculer les nouvelles valeurs des autres paramètres (nœuds $N_i, i \neq 1$) causées par le changement de la valeur du nœud instigateur.

Le calcul des valeurs des nœuds est exécuté couche par couche. Dans le cas de cet exemple, on calcule les nouvelles valeurs des nœuds N_2 et N_3 tout d'abord, puis N_4 et N_5 par la suite. Bien que le nœud N_4 est un successeur de N_1 , nous devons calculer la nouvelle valeur de N_2 et N_3 avant de passer au calcul de N_4 . En effet, la distance d_4 est égale à 2, ce qui correspond à la longueur du chemin le plus long ($\Gamma_1 = \{1, 2, 4\}$ ou $\Gamma_2 = \{1, 3, 4\}$).

Le calcul de la nouvelle valeur du nœud N_4 nécessite l'agrégation des valeurs des prédécesseurs N_1, N_2 et N_3 par l'utilisation d'un opérateur d'agrégation convergente. D'autre part, le calcul de la nouvelle valeur du nœud N_5 nécessite l'agrégation des valeurs des paramètres N_1 et N_3 déjà calculées en utilisant un opérateur d'agrégation en série.

Pour calculer l'impact de la propagation (les nouvelles valeurs des paramètres après changement) selon la méthode de propagation par couche, nous présentons l'algorithme 1.

Ici, le terme matrice d'adjacence B représente la matrice binaire B représentée dans le chapitre 3 précédent lors de la présentation de l'approche d'identification des dépendances. Cet algorithme calcule tout d'abord pour chaque nœud j , la distance maximale d_j , représentant la longueur du chemin le plus long partant du nœud instigateur i_0 et allant vers lui, obtenue par l'algorithme de Bellman de calcul du chemin le plus long. En tenant compte de cette distance, les nœuds sont ensuite divisées en couche L_c .

Enfin, en considérant l'incrémentation de la distance jusqu'à $c_{max} = \max(d_j, j \in N)$, on calcule pour chaque nœud dans chaque couche, les nouvelles valeurs évaluées dans le vecteur $\hat{X} = \{\hat{x}_j, j \in N\}$. Le calcul de cette valeur agrégée dépend de l'opérateur d'agrégation utilisé.

Algorithm 1 Méthode de propagation par couches

```

1: Variables d'entrée Graphe  $G = (N, E)$ , Nombre de nœuds  $n = |N|$ , Matrice  $(n \times n)$  de dépendance fonctionnelle  $F$ , Valeurs initiales  $X = \{x_i^0, i \in N\}$ , Nœud instigateur  $i_0$ , Nouvelle valeur  $\hat{x}_{i_0}$  de  $i_0$ , Matrice  $(n \times n)$  d'adjacence  $B$ 
2: Variables de sortie Nouvelles valeurs  $\hat{X} = \{\hat{x}_i, i \in N\}$ , Variations  $\Delta = \delta_i, i \in E$ 
3: Variables intermédiaires Indices des nœuds  $j, k$ , Indices des couches  $c$ , Nombre de couches  $c_{max}$ 
4:
5: Calculer la longueur  $d_j$  du plus long chemin entre  $i_0$  et tout les autres nœuds  $j \in N - \{i_0\}$ , en termes de nombre de nœuds.
6:  $L_c = \emptyset, \forall c \leq c_{max}$  avec  $c_{max} = \max(d_j, j \in N)$ 
7: for  $j = 1$  to  $N$  do
8:    $L_{d_j} \leftarrow L_{d_j} \cup \{j\}$ 
9: end for
10:  $c \leftarrow 1$ 
11:  $\delta_{i_0} \leftarrow \hat{x}_{i_0} - x_{i_0}^0$  {Calculer la variation de la valeur du nœud instigateur  $i_0$ }
12: while  $c \leq c_{max}$  do
13:   for each node  $j \in L_c$  do
14:      $\hat{x}_j \leftarrow$  Agrégation selon  $\oplus$  de tout  $\hat{x}_k$  tant que  $B_{kj} = 1$  {Calculer la nouvelle valeur du nœud  $j$  en utilisant la matrice  $F$  et remplaçant la valeur de l'agrégateur par l'une des équations (4.8), (4.10), (4.12) ou (4.14)}
15:      $\delta_j \leftarrow \hat{x}_j - x_j^0$ 
16:   end for
17:    $c \leftarrow c + 1$ 
18: end while

```

4.5.2 La méthode Path propagation (par chemins)

Nous proposons aussi une deuxième méthode de propagation, se basant sur le principe de parcours en profondeur.

Pour cette deuxième approche de propagation, nous commençons par l'énumération de tous les chemins de propagation possibles partant du nœud instigateur vers les nœuds d'arrêt de propagation, voir Figure 4.6b. Le long de chaque chemin, les nouvelles valeurs sont calculées à l'aide des dépendances fonctionnelles.

Lors du calcul des nouvelles valeurs des paramètres, nous utilisons de nouveau la composition fonctionnelle comme agrégateur en série. L'opérateur d'agrégation convergente est utilisé dans la méthode de propagation par chemins pour calculer les nouvelles valeurs des nœuds après propagation.

Tous les chemins de propagation partant du nœud instigateur peuvent être représentés sous forme d'un arbre de propagation. Si on revient à l'exemple de la Figure 4.5a, l'arbre de propagation est donné dans la Figure 4.6a.

Pour calculer l'impact de la propagation (les nouvelles valeurs des paramètres après changement) selon la méthode de propagation par chemins, nous présentons l'algorithme 2.

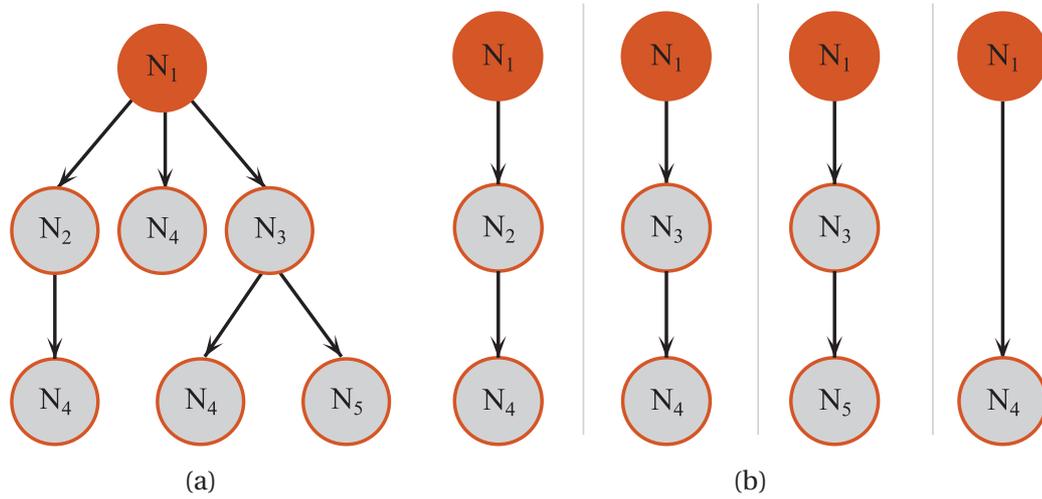


FIGURE 4.6 – Arbre et chemins de propagation

Dans cet algorithme, nous initialisons une variable notée par $V = \{v_i[], i \in N\}$, qui contiendra tous les valeurs propagées pour chaque nœud i en parcourant tous les chemins de propagation possibles (quelques soit leur longueur). Nous remplissons ensuite une liste L , définie par l'ensemble des chemins entre le nœud instigateur i_0 est les feuilles de l'arbre de propagation. Ce remplissage est effectué à partir de la matrice binaire B et suivant un tri lexicographique (c'est-à-dire, les chemins possédant une partie commune de i_0 vers un nœud i intermédiaire, se succèdent dans cette liste). Puis, nous parcourons la liste L , chemin par chemin. Pour chaque chemin c , nous propageons le calcul d'impact en calculant à chaque fois la nouvelle valeur du nœud intermédiaire de c . Les nouvelles valeurs seront sauvegardées à chaque fois dans la liste L . La variable *prec* permet à son tour de sauter les calculs qui ont été déjà réalisés à l'étape précédente.

Les valeurs de la liste L sont ensuite utilisées pour calculer les nouvelles valeurs agrégés de chaque nœud recueillies dans le vecteur $\hat{X} = \{\hat{x}_j, j \in N\}$, selon l'opérateur d'agrégation choisi, en remplaçant sa valeur par l'une des équations (4.8), (4.10), (4.12) ou (4.14). Les variations sont aussi sauvegardées dans un vecteur Δ .

Algorithm 2 Méthode de propagation par chemins

- 1: **Variables d'entrée** Graphe $G = (N, E)$, Nombre de nœuds $n = |N|$, Matrice $(n \times n)$ de dépendance fonctionnelle F , Valeurs initiales $X = \{x_i^0, i \in N\}$, Listes de valeurs de valeurs d'impact intermédiaires $L = \{l_i[], i = \text{indice du chemin}\}$, Nœud instigateur i_0 , Nouvelle valeur \hat{x}_{i_0} de i_0 , Matrice $(n \times n)$ d'adjacence B
 - 2: **Variables de sortie** Nouvelles valeurs $\hat{X} = \{\hat{x}_i, i \in N\}$, Variations $\Delta = \delta_i, i \in E$, Valeurs d'impact de propagation $V = \{v_i[], i \in N\}$
 - 3: **Variables intermédiaires** indice p , Chemins $c = \{c[i], i =, \text{indice des nœuds}\}$
 - 4:
 - 5: $v_i[] \leftarrow \emptyset, \forall i \in 1, \dots, n$
 - 6: Remplir $L =$ liste des chemins entre le nœud i_0 et les feuilles de l'arbre de propagation en utilisant la matrice B {chaque chemin sera conservé sous forme de tableau contenant la succession des nœuds de i_0 vers la feuille}
 - 7: Trier L par ordre lexicographique {les chemins possédant une partie commune de i_0 vers un nœud i intermédiaire, se succèdent dans cette liste}
 - 8: $prec \leftarrow \emptyset$
 - 9: **for** chaque chemin $c \in L$ **do**
 - 10: $p \leftarrow$ dernier nœud de c commun avec $prec$
 - 11: Propager (à l'aide de la matrice F) l'impact sur chaque élément i de c en partant de p et conserver chaque valeur dans la liste $v_i[]$
 - 12: $prec = c$
 - 13: **end for**
 - 14: $\delta_{i_0} \leftarrow \hat{x}_{i_0} - x_{i_0}^0$ {Calculer la variation de la valeur du nœud instigateur i_0 }
 - 15: **for** each node $j \in N$ **do**
 - 16: $\hat{x}_j \leftarrow$ Agrégation selon \oplus de tout les éléments de $v_j[]$ {Calculer la nouvelle valeur du nœud j en utilisant la matrice F et remplaçant la valeur de l'opérateur d'agrégation par l'une des equations (4.8), (4.10), (4.12) or (4.14)}
 - 17: $\delta_j \leftarrow \hat{x}_j - x_j^0$
 - 18: **end for**
-

4.6 Application des deux méthodes sur un cas illustratif

Un exemple illustratif est présenté ici, afin de comparer les deux méthodes de propagation. Le graphe de la Figure 4.7 est composé de six nœuds $N_i, \forall i \in \{1, \dots, 6\}$ (correspondant aux paramètres de valeurs x_i) reliés entre eux par des arcs (arêtes orientées) représentant les dépendances.

Le poids de chaque arc est une fonction linéaire ou polynomiale, qui représente la dépendance fonctionnelle entre les deux nœuds correspondants. On rappelle que la fonction de dépendance relie la variation d'un paramètre j à son prédécesseur i . Autrement dit, $\delta_j = f_{i,j}(\delta_i)$ mais l'égalité $x_j = f_{i,j}(x_i)$ peut ne pas être vraie après propagation.

Le nœud instigateur dans cet exemple, est le nœud N_1 dont la valeur initiale est $x_1 = 10$ et la nouvelle valeur imposée est $\hat{x}_1 = 12$, c'est-à-dire, que la variation ou l'écart de changement est $\delta_1 = 2$.

4.6.1 Méthode de propagation par couches

Selon la méthode de propagation par couches, pour un nœud i donné, la quantité δ_i peut être calculée si et seulement si les valeurs de ses nœuds prédécesseurs ont été déjà calculées. Cela peut être fait en calculant pour chaque nœud, la distance de son plus long chemin, notée par d_i , depuis le nœud instigateur N_1 . Par exemple, $d_2 = 2$ pour N_2 , selon le chemin $\{N_1, N_5, N_2\}$.

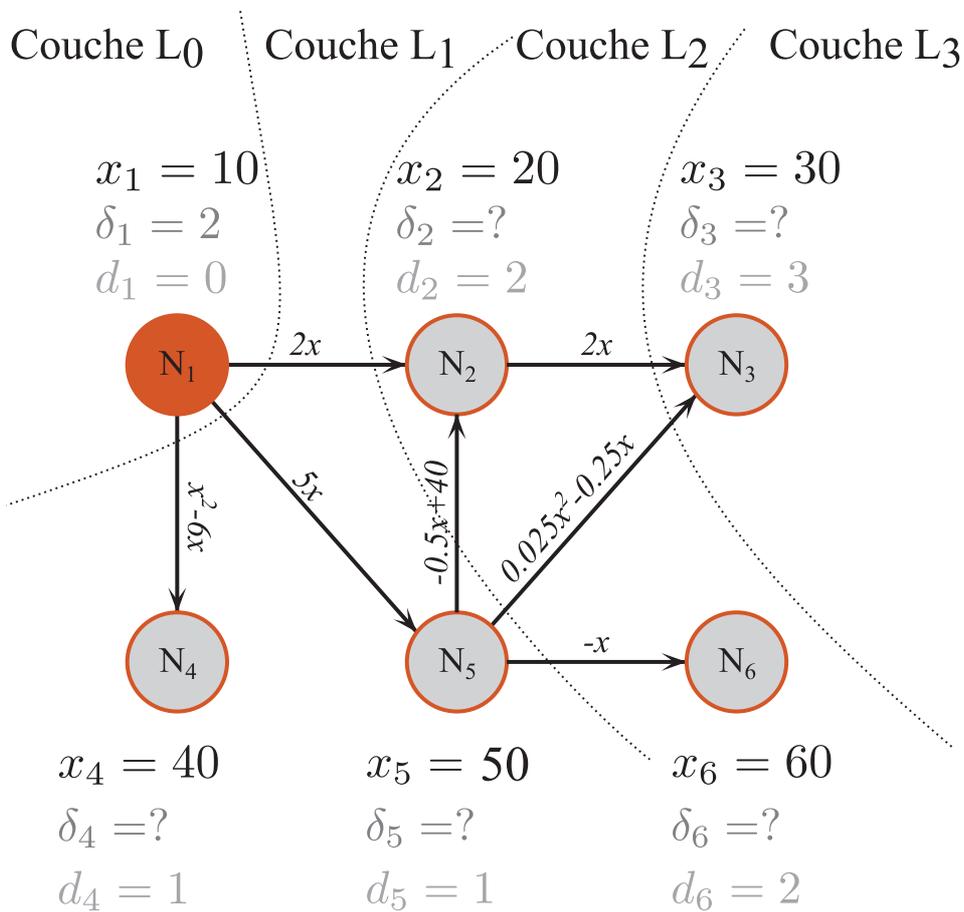


FIGURE 4.7 – Exemple illustratif

Par conséquent, les nœuds peuvent être partitionnés et classés en couches $L_c = \{i \in N \mid d_i = c\}, \forall c \in 1, \dots, c_{max}$ où $c_{max} = \max_{i \in N} (d_i)$ est la longueur maximale du plus long chemin partant de N_1 .

Ensuite, pour tous les nœuds i de chaque couche examinée, en incrémentant le rang c jusqu'à c_{max} , on évalue la nouvelle valeur (\hat{x}_i), $\forall i \neq 1$ après changement en utilisant la matrice de dépendance fonctionnelle.

Nous choisissons dans cet exemple l'opérateur d'agrégation convergente par la différentielle totale. Les nœuds N_4 et N_5 qui appartiennent à la couche L_1 doivent être évalués avant le nœud N_2 , qui appartient à son tour à la couche L_2 , selon les équations suivantes :

$$\hat{x}_4 = x_4^0 + \delta_4 = x_4^0 + (\delta_1)^2 - 6\delta_1 \quad (4.15)$$

$$\hat{x}_5 = x_5^0 + \delta_5 = x_5^0 + 5\delta_1 \quad (4.16)$$

Et pour calculer la nouvelle valeur de N_2 , nous utilisons la différentielle totale :

$$df_2(x_1, x_5) = \left(\frac{\partial f_2(x_1, x_5)}{\partial x_1} \right)_{x_5=x_5^0} dx_1 + \left(\frac{\partial f_2(x_1, x_5)}{\partial x_5} \right)_{x_1=x_1^0} dx_5 \quad (4.17)$$

Nous commençons par calculer les dérivées partielles :

$$\left(\frac{\partial f_2(x_1, x_5)}{\partial x_1} \right)_{x_5=x_5^0} = 2 \quad \left(\frac{\partial f_2(x_1, x_5)}{\partial x_5} \right)_{x_1=x_1^0} = -0.5 \quad (4.18)$$

Enfin, nous pouvons en déduire la nouvelle valeur du paramètre affecté N_2 :

$$\hat{x}_2(x_1, x_5) = x_2^0 + df_2(x_1, x_5) = x_2^0 + 2dx_1 - 0.5dx_5 \quad (4.19)$$

L'application numérique de la nouvelle valeur du paramètre N_2 donne :

$$\hat{x}_2(x_1, x_5) = 20 + 2 \times 2 - 0.5 \times 10 = 19 \quad (4.20)$$

La nouvelle valeur du nœud N_6 est calculée en appliquant la définition de l'opérateur d'agrégation en série, la composition de fonctions par l'équation suivante :

$$\hat{x}_6 = x_6^0 + f_{5,6}(\delta_5) = x_6^0 - \delta_5 \quad (4.21)$$

Ensuite, puisque le nœud N_3 possède deux prédécesseurs N_2 et N_5 , nous pouvons calculer sa nouvelle valeur en utilisant ses dérivées partielles, obtenue par le principe de simulation contrôlée, et écrivant ensuite la différentielle totale de la fonction f_3 :

$$df_3(x_2, x_5) = \left(\frac{\partial f_3(x_2, x_5)}{\partial x_2} \right)_{x_5=x_5^0} dx_2 + \left(\frac{\partial f_3(x_2, x_5)}{\partial x_5} \right)_{x_2=x_2^0} dx_5 \quad (4.22)$$

$$\left(\frac{\partial f_3(x_2, x_5)}{\partial x_2} \right)_{x_5=x_5^0} = 2 \quad (4.23)$$

$$\left(\frac{\partial f_3(x_2, x_5)}{\partial x_5} \right)_{x_2=x_2^0} = 0.05\delta_5 - 0.25 \quad (4.24)$$

Enfin, nous pouvons en déduire la nouvelle valeur du paramètre affecté N_3 :

$$\hat{x}_3(x_2, x_5) = x_3^0 + df_3(x_2, x_5) = x_3^0 + 2dx_2 + (0.05\delta_5 - 0.25)dx_5 \quad (4.25)$$

Faisons maintenant l'application numérique de la nouvelle valeur du paramètre N_3 :

$$\hat{x}_3(x_2, x_5) = 30 + 2 \times (-1) + (0.05 \times 10 - 0.25) \times 10 = 30.5 \quad (4.26)$$

Le tableau suivant regroupe toutes les valeurs obtenues après la propagation de changements.

TABLEAU 4.1 – Calcul de propagation selon la méthode de propagation par couche

Nœud (N_i)		N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6
Valeur initiale (x_i^0)		10	20	30	40	50	60
Agrégation	Couche (L_c)	Nouvelles valeurs (\hat{x}_i)					
$\oplus = diff$	L_0	12					
	L_1				32	60	
	L_2		19				50
	L_3			30,5			
	Valeurs agrégées (\hat{x}_i)	12	19	30,5	32	60	50
	Variations agrégées $\hat{\delta}_i$	0	-1	0,5	-8	10	-10

4.6.2 Méthode de propagation par chemin

Selon la méthode de propagation par chemin, on commence par énumérer tous les chemins possibles à partir du nœud instigateur i à un autre nœud $j \neq i$.

Dans le Tableau 4.2, on présente cinq chemins $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$ et Γ_5 . Ces cinq chemins de propagation contiennent aussi d'autres chemins. Par exemple, $\Gamma_6 = \{N_1, N_5\} \subset \Gamma_2 = \{N_1, N_5, N_3\}$ et partagent la même valeur de \hat{x}_5 après la propagation du changement. Mais, dans d'autres cas, les valeurs des nœuds peuvent être différentes d'un chemin à un autre quand l'un est un sous-chemin de l'autre.

Au total, il y a huit chemins qui relient le nœud instigateur i aux autres nœuds $j \neq i$. Les nouvelles valeurs des nœuds pour chaque chemin sont calculées et présentées dans le Table 4.2.

Dans cet exemple, le nœud N_2 , possède deux chemins possibles $\{N_1, N_2\}$ et $\{N_1, N_5, N_2\}$.

Une fois que les nouvelles valeurs des nœuds sont calculées pour tous les chemins possibles, nous passons à l'agrégation des valeurs en donnant une valeur unique pour chaque paramètre. Nous supposons que l'agrégation de deux ou plusieurs valeurs possibles d'un même nœud peut être obtenue via les opérateurs d'agrégation suivants : maximum, minimum, ou moyenne. Les valeurs de certains paramètres dépendent de l'opérateur d'agrégation (cas de N_3), d'autres sont indépendantes (comme N_5). Revenons au cas de N_3 , où il y a trois chemins de propagation $\Gamma_1 = \{N_1, N_2, N_3\}$, $\Gamma_2 = \{N_1, N_5, N_3\}$ et $\Gamma_3 = \{N_1, N_5, N_2, N_3\}$ et 38, 30 et 20 sont respectivement les nouvelles valeurs du paramètre N_3 après la propagation du changement de ces chemins.

TABLEAU 4.2 – Calcul de propagation selon la méthode de propagation par chemin

Nœud (N_i)	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6
Valeur initiale (x_i^0)	10	20	30	40	50	60
Chemin (Γ_c)	Nouvelles valeurs (\hat{x}_i)					
$\Gamma_1 = \{N_1, N_2, N_3\}$	12	24	38			
$\Gamma_2 = \{N_1, N_5, N_3\}$	12		30		60	
$\Gamma_3 = \{N_1, N_5, N_2, N_3\}$	12	15	20		60	
$\Gamma_4 = \{N_1, N_4\}$	12			32		
$\Gamma_5 = \{N_1, N_5, N_6\}$	12				60	50
Valeurs agrégées $\oplus = \max$	12	24	38	32	60	50
Valeurs agrégées $\oplus = \min$	12	15	20	32	60	50
Valeurs agrégées $\oplus = \text{avg}$	12	13	29,3	32	60	50

4.6.3 Comparaison des deux méthodes

Les deux méthodes partagent le même objectif : calculer les nouvelles valeurs des nœuds après propagation d'un changement de la valeur d'un nœud instigateur.

Il est intéressant de les comparer pour voir l'impact de choix des opérateurs d'agrégation sur les nouvelles valeurs des nœuds après propagation. Comme attendu, les deux méthodes ne conduisent pas aux mêmes nouvelles valeurs des nœuds après propagation à cause des opérateurs d'agrégation différents utilisés. En fait, le même opérateur d'agrégation en série (la composition fonctionnelle) est utilisé dans les deux méthodes, alors que l'opérateur d'agrégation convergente n'est pas le même. D'une part, on utilise pour la méthode de propagation par couche la notion de dérivée partielle et d'autre part, on fait appel aux opérateurs max, min ou moyenne dans la méthode de propagation par chemin.

L'utilisation de la différentielle totale et des dérivées partielles lors de l'agrégation semble plus logique que l'utilisation de l'un des trois opérateurs (maximum, minimum et moyenne) puisqu'on se base sur une théorie qui permet de combiner les influences des différents nœuds prédécesseurs de manière contrôlée en utilisant notamment une approximation de la variation totale comme une somme pondérée des variations partielles apportées par chacun des nœuds prédécesseurs ; cette pondération étant la variation des valeurs de chacun des nœuds. Par ailleurs, le modèle de dépendance présenté dans le chapitre 3 précédent est composé de fonctions polynômiales liant les paramètres deux à deux mais grâce à la différentielle totale, nous parvenons à approcher la variation multivariée en fonction de ces variations bivariées.

Toutefois, il n'est pas possible d'utiliser la différentielle totale comme opérateur d'agrégation dans la méthode de propagation par chemin. En effet, l'agrégation ne se manifeste dans cette méthode qu'à la fin de la propagation, c'est-à-dire lors du calcul de la nouvelle valeur du nœud après avoir calculé ses différentes valeurs possibles pour chaque chemin. Dans le cas d'un nœud intermédiaire qui possède plus d'un prédécesseur, l'agrégation n'est pas prise en compte. Afin de comprendre ce point, nous revenons à l'exemple explicatif de la Figure 3. Si nous nous concentrons sur le calcul de la nouvelle valeur du nœud N_3 , nous avons besoin de faire le calcul intermédiaire des trois chemins $\Gamma_1 = \{1, 2, 3\}$, $\Gamma_2 = \{1, 5, 3\}$ et $\Gamma_3 = \{1, 5, 2, 3\}$.

On peut appliquer l'opérateur d'agrégation sur le nœud N_3 :

$$\hat{x}_3(x_2, x_5) = x_3^0 + df_3(x_2, x_5) = x_3^0 + \left(\frac{\partial f_3(x_2, x_5)}{\partial x_2} \right) dx_2 + \left(\frac{\partial f_3(x_2, x_5)}{\partial x_5} \right) dx_5 \quad (4.27)$$

Par contre, cette équation ne prend en considération que deux termes : un premier $\left(\left(\frac{\partial f_3(x_2, x_5)}{\partial x_5} \right) dx_5 \right)$ pour le chemin $\Gamma_2 = \{1, 5, 3\}$ et un deuxième $\left(\left(\frac{\partial f_3(x_2, x_5)}{\partial x_2} \right) dx_2 \right)$ qui devrait représenter les deux chemins ensemble $\Gamma_1 = \{1, 2, 3\}$ et $\Gamma_3 = \{1, 5, 2, 3\}$. Puisqu'il s'agit de deux chemins différents, on a deux valeurs différentes de \hat{x}_2 et la méthode ne peut pas spécifier quelle valeur résultante choisir parmi ces deux.

Afin de comparer les deux méthodes (applications des deux principes de parcours de graphes) indépendamment des opérateurs d'agrégation utilisés, nous devons utiliser les mêmes opérateurs dans les deux méthodes de propagation. Pour cela, nous choisissons les opérateurs de la méthode de propagation par chemin pour les appliquer à la méthode de propagation de propagation par couche.

Le Tableau 4.3 représente les résultats des nouvelles valeurs des nœuds après changement en suivant les deux méthodes de propagation (notées par M1 et M2) en utilisant les mêmes opérateurs d'agrégation. M1 représente la méthode de propagation par couches.

TABLEAU 4.3 – Calcul de propagation selon les deux méthodes de propagation

Nœud (N_i)		N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6
Valeur initiale (x_i^0)		10	20	30	40	50	60
Agrégation (Γ_c)		Nouvelles valeurs (\hat{x}_i)					
$\oplus = \max$	M1	12	24	38	32	60	50
	M2	12	24	38	32	60	50
$\oplus = \min$	M1	12	15	20	32	60	50
	M2	12	15	20	32	60	50
$\oplus = \text{avg}$	M1	12	13	23	32	60	50
	M2	12	13	29,3	32	60	50

La seule différence au niveau des nouvelles valeurs des nœuds est la valeur de \hat{x}_3 en utilisant la moyenne comme étant l'opérateur d'agrégation convergente. Pour comprendre la cause de cette différence, nous exprimons ici la valeur de \hat{x}_3 en fonction des autres nœuds et des opérateurs.

L'équation suivante représente l'expression de la nouvelle valeur du nœud 3 selon la méthode de propagation par chemin :

$$\hat{x}_3 = (x_1 \otimes x_2) \oplus (x_1 \otimes x_5) \oplus (x_1 \otimes x_5 \otimes x_2) \quad (4.28)$$

Cette deuxième équation représente à son tour la nouvelle valeur du nœud 3 selon la méthode de propagation par couche :

$$\hat{x}_3 = ((x_1 \oplus (x_1 \otimes x_5)) \otimes x_2) \oplus (x_1 \otimes x_5) \quad (4.29)$$

Si l'opérateur \otimes est distributif à droite par rapport au deuxième opérateur \oplus , les deux équations seront équivalentes, et donc, les deux méthodes donnent les mêmes résultats.

On rappelle qu'en algèbre générale, on dit qu'une loi de composition interne \otimes est distributive à droite par rapport à une autre loi interne \oplus dans un ensemble E si pour tout triplet (x, y, z) d'éléments de E , on vérifie la propriété suivante :

$$(x \oplus y) \otimes z = (x \otimes z) \oplus (y \otimes z) \quad (4.30)$$

En conclusion, même si on choisit le même opérateur d'agrégation convergente, il doit être distributif à droite pour que les deux méthodes conduisent aux mêmes résultats, ce qui est le cas des opérateurs maximum et minimum qui vérifient les relations suivantes :

$$\max(x; y) \otimes z = \max((x \otimes z); (y \otimes z)) \quad (4.31)$$

$$\min(x; y) \otimes z = \min((x \otimes z); (y \otimes z)) \quad (4.32)$$

La méthode de propagation par chemin traite les chemins séparément; chacun est indépendant de l'autre. Par opposition, la méthode de propagation par couche calcule les nouvelles valeurs des nœuds en tenant compte des arcs qui sont communs dans certains chemins.

Comparons maintenant la complexité algorithmique (étude formelle de la quantité de ressources utilisées (*e.g.* de temps et de mémoire) pour l'exécution d'un algorithme) des algorithmes 1 et 2 implémentés pour les deux méthodes de propagation par couches et par chemins.

Commençons par rappeler la valeur de la complexité des deux principes de parcours de graphes utilisés (parcours par largeur et parcours par profondeur). Ces deux parcours ont une complexité temporelle linéaire en nombre de nœuds et d'arcs. En effet, on parcourt chaque nœud ou arc une seule fois et on effectue quelques opérations (instructions de calcul) qui ont un temps constant. Généralement si l'arbre comporte n nœuds et m arcs, on note la complexité d'un parcours par largeur ou par profondeur par $O(n + m)$.

Pour la complexité en mémoire, le parcours par profondeur possède une complexité égale à $O(H)$ avec H est égale à la profondeur maximale de l'arbre (la longueur du chemin le plus long). Quant au parcours par largeur, il possède une complexité en mémoire égale à $O(L)$ avec L est égale à la largeur maximale des couches. Mais généralement on est incapable de déterminer la valeur de L et H pour un arbre de n nœuds et m arcs, c'est pourquoi nous nous intéressons ici à calculer la complexité temporelle.

Chacun de ces deux algorithmes 1 et 2 contient une partie pour parcourir le graphe et calculer les nouvelles valeurs des paramètres. Le parcours du graphe dans notre algorithme 1 implémenté ressemble en termes de complexité en temps à celui d'un parcours classique par largeur. Par contre, le parcours du graphe dans l'algorithme 2 implémenté pour représenter la méthode de propagation par chemins est un peu différent en termes de complexité que celui d'un parcours classique par profondeur. Ceci vient du fait que dans un parcours par profondeur, on parcourt chaque nœud une seule fois même s'il possède plus qu'un seul prédécesseur, et dans notre algorithme 2, nous parcourons un nœud plusieurs fois (suivant le nombre de ses prédécesseurs et des agrégations existants dans le graphe). Par exemple, on peut avoir un nœud qui apparaît 3 fois dans les différents chemins de propagation alors qu'il présente uniquement deux prédécesseurs.

En prenant en compte les principes de la théorie de complexité algorithmique, nous prenons le pire des cas possibles lors du calcul de la complexité d'un algorithme. Donc nous pouvons conclure que la complexité du parcours du graphe dans l'algorithme 2 est supérieure à $O(n + m)$. Nous pouvons donc conclure que le parcours du graphe dans l'algorithme 1 est plus efficace en termes de temps de calcul que l'algorithme 2. Les deux algorithmes contiennent en complément du parcours du graphe, d'autres instructions. L'algorithme 1 commence par le calcul des distances d_i et de la distance maximale puis par

le remplissage des nœuds dans les couches avant de parcourir le graphe. L'algorithme 2 à son tour comporte une énumération des chemins de propagation possibles, le parcours de ces chemins puis une agrégation de différentes valeurs possibles de chaque nœud. Sachant que la complexité d'un algorithme est la somme des complexités de chacune de ces parties, donc pour réduire la complexité d'un algorithme, nous pouvons modifier l'une de ces parties et réduire le temps nécessaire pour l'implémenter. Par exemple, pour optimiser la complexité de l'algorithme 2, nous proposons de combiner la partie d'énumération des différents chemins de propagation avec la partie de parcours de graphe. Un algorithme 3 (et sa procédure récursive dans l'algorithme 4) est présenté en annexe A représentant cette modification.

4.7 Exploitation de la propagation du changement pour la conception

Suite à l'identification et la caractérisation des dépendances et la propagation des changements, une interprétation peut être faite afin de choisir le changement le plus efficace d'un point de vue bien déterminé. Dans cette section, nous revenons sur la troisième phase indiquée au chapitre précédent dans la Figure 3.1. Cette troisième phase vise à aider les concepteurs à la prise de décision lors de la re-conception du produit mis en étude.

Une fois que la propagation est réalisée, étant données les valeurs initiales du paramètre i , nous pouvons calculer pour chacun des paramètres, les quantités suivantes :

- La variation absolue d'un paramètre j , représenté par δ_j , tel que :

$$\delta_j = \hat{x}_j - x_j^0 \quad (4.33)$$

- La variation relative d'un paramètre j

$$\frac{\delta_j}{(x_j^0)} = \frac{\hat{x}_j - x_j^0}{x_j^0} \quad (4.34)$$

- Le taux de variation de la valeur du paramètre j selon le changement effectué sur le nœud i , représenté par $\Delta_{i,j}$, tel que :

$$\delta_{i,j} = \frac{\hat{x}_j - x_j^0}{\hat{x}_i - x_i^0} = \frac{\delta_j}{\delta_i}, \quad \forall i \neq j \quad (4.35)$$

x_i^0 et x_j^0 sont les valeurs initiales des nœuds i et j ; \hat{x}_i et \hat{x}_j sont les nouvelles valeurs du nœud instigateur i et les autres nœuds respectivement, tels que $\hat{x}_j = x_j^0 + f_{i,j}(\delta_i)$.

Ces trois types d'indicateur de variation peuvent être utiles pour l'aide à la décision lors de l'évaluation d'impacts des changements en l'affectant à un coût. Par exemple, si on a une estimation du coût de la modification de la valeur d'un paramètre en une unité (e.g. un changement de $+1cm$ sur le paramètre i vaut $x\$$), on utilisera dans ce cas, la variation absolue pour calculer le coût total du changement effectué. Par contre, si ce coût est estimé pour un changement de 1% de la valeur du paramètre, on utilisera la variation relative et le coût total sera :

$$C_{Total} = C_j \times \frac{\delta_j}{x_j^0} \quad (4.36)$$

4.8 Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre était de proposer une démarche de propagation de changement en adéquation avec la nature de la caractérisation des relations de dépendances entre ses composants (réalisée au chapitre précédent) dans le but d'évaluer l'impact de la propagation d'un changement à travers le produit. Les dépendances fonctionnelles introduites qui procurent une bonne capacité d'analyse en comparant les autres caractérisations de dépendances qualitatives et quantitatives, sont utilisées dans cette approche pour calculer les nouvelles valeurs des nœuds après changement.

Deux méthodes de propagation de changements ont été proposées : la méthode de propagation par chemins et la méthode de propagation par couches. Les détails et l'algorithme pour chaque méthode sont également présentés.

La comparaison des deux méthodes montre que la méthode de propagation par couches est la méthode la plus adéquate en tenant compte des hypothèses prises lors de l'établissement du graphe de dépendance. Contrairement à la méthode de propagation par chemins, la méthode de propagation par couches prend en considération l'agrégation des nœuds intermédiaires dans un chemin de propagation qui possèdent plus d'un prédécesseur.

Les résultats trouvés peuvent être utilisés ensuite pour être exploités par les concepteurs afin de les aider à prendre leur décision lors des projets de re-conception. Notre méthode prépare toute évaluation des attributs (coût, délai, *etc.*). En effet, dès lors qu'on est capable de trouver les nouvelles valeurs potentielles d'un paramètre impacté (par exemple, la consommation électrique est plus importante dans une voiture), on pourra établir un lien entre cette variation et l'attribut associé au paramètre (par exemple, son coût supplémentaire, *etc.*).

Chapitre 5

Étude de cas

« Ideas are easy. Implementation is hard »

Guy Kawasaki

Sommaire

5.1 Introduction	76
5.2 Le cas du vélo	76
5.3 Application de la méthode d'identification (étape par étape)	80
5.3.1 Étape 1 : La modélisation du système	80
5.3.2 Étape 2 : La simulation des changements par variation libre	82
5.3.3 Étape 3 : L'identification préliminaire	83
5.3.4 Étape 4 : La simulation des changements par variation contrôlée	86
5.3.5 Étape 5 : La caractérisation des dépendances	87
5.3.6 Étape 6 : L'établissement du graphe de dépendance	87
5.3.7 Différentes technologies utilisés pour l'application de la méthode d'identification des dépendances :	88
5.4 Vérification	90
5.5 Application de la propagation des changements sur le vélo	91
5.5.1 Méthode de propagation par chemin	93
5.5.2 Méthode de propagation par couche	93
5.6 Conclusion	97

5.1 Introduction

Dans les deux chapitres précédents, nous avons présenté notre approche d'identification des dépendances et d'évaluation par propagation des changements au sein d'un produit.

Dans ce chapitre, nous nous plaçons dans le cas d'un renouvellement d'un produit (un vélo), pour lequel une demande de changement a été effectuée dans le but d'améliorer un critère (de cyclabilité ou d'esthétisme, par exemple). Pour arriver à prévoir l'impact d'un tel changement sur l'ensemble du vélo, nous appliquons dans ce chapitre, l'approche proposée dans cette thèse au cas d'une demande de changement, nécessitant la re-conception ou l'amélioration du vélo. Nous commençons par la présentation du cas d'application qui sera utilisé tout au long du chapitre, pour ensuite dérouler les deux phases de la méthode. Les différents résultats relatifs à l'identification des dépendances et au calcul subséquent d'impact par propagation d'un changement initial sur le modèle géométrique de ce produit sont présentés. Ce chapitre se termine par une évaluation et une critique de notre approche.

5.2 Le cas du vélo

Un vélo classique existant dans le marché Français a été choisi pour être un cas illustratif de l'approche proposée.

Avant de commencer à identifier les différentes dépendances qui existent entre les paramètres du vélo, une étape de collection d'informations est requise afin d'identifier les paramètres et sélectionner ceux qui seront intéressants pour l'étude.

La Figure 5.1 montre une description de différents composants du vélo. Ce type de modèle est généralement utilisé pour identifier les différents objets du système formant sa nomenclature. La Figure 5.2 contient une première classification selon la nomenclature

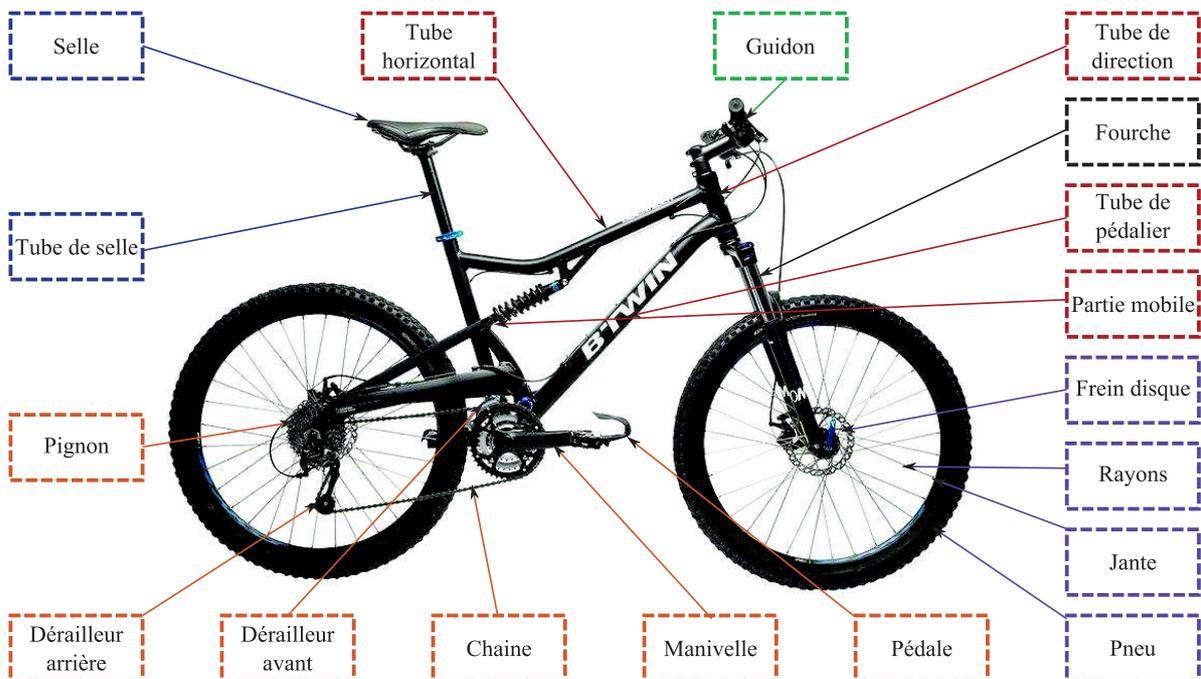


FIGURE 5.1 – Les composants du vélo

ou **Bill of Materials (BOM)** des différents composants physiques du vélo. Rappelons que la nomenclature est une liste des matières premières, sous-ensembles, ensembles intermédiaires, des sous-composants, pièces et les quantités de chacun nécessaires à la fabrication d'un produit final, qui peut être représentée aussi sous forme de tableau.

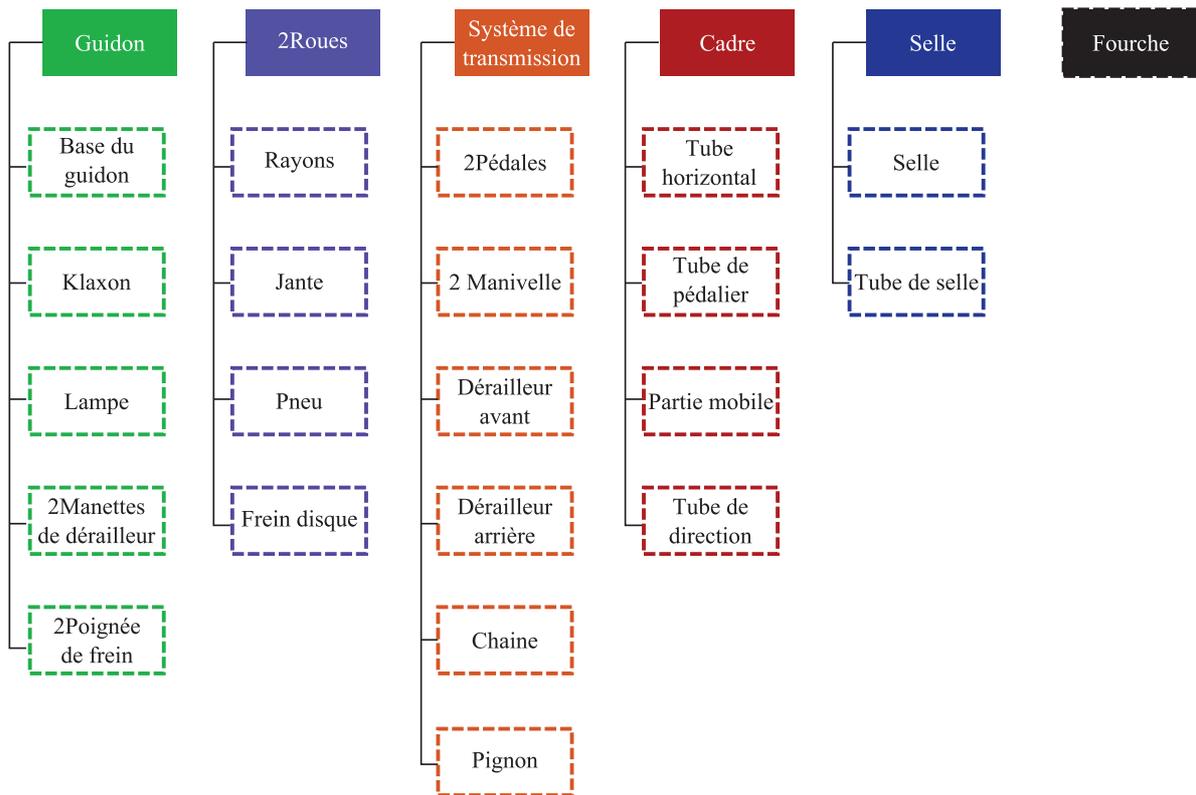


FIGURE 5.2 – Classification des composants du vélo

A partir de ce niveau de décomposition du système, on descend à un niveau plus bas en caractérisant les attributs pour chaque sous-ensemble en les modélisant dans un diagramme (voir Figure 5.3).

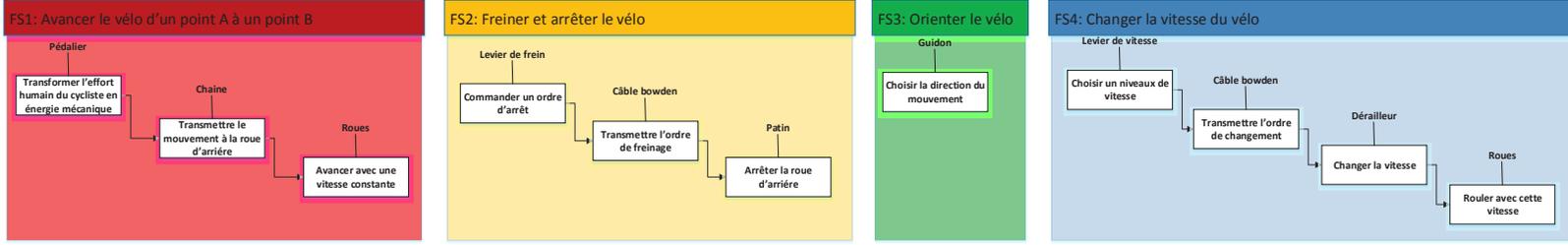
Comme on peut le remarquer, les attributs considérés peuvent être en relation avec soit la forme géométrique, le poids, soit les matériaux utilisés pour chacun des cinq sous-ensembles du vélo. Afin de simplifier et surmonter la complexité de l'étude d'évaluation d'impact des changements qui peuvent être réalisés sur l'un ou plusieurs de ces attributs, nous avons supposé dans l'approche proposée dans le chapitre 3, de ne prendre en compte que l'aspect géométrique du produit. Malgré que la modélisation géométrique ne couvre pas tous les aspects du produit, elle est considérée comme étant l'activité la plus essentielle pour tout début d'étude dans l'ingénierie d'aujourd'hui. De plus, les changements étudiés plus tard sont de type géométrique (*e.g.* modification de la valeur d'une longueur), ce qui justifie la prise en compte des attributs géométriques (angles et longueurs).

En plus de la vision physique (structurale) d'un système, une vision fonctionnelle peut aussi être considérée. La Figure 5.4 relie les deux visions appliquées à notre étude de cas ; d'une part les fonctions de service (représentées par quatre couleurs différentes) et d'autre part les composants physiques du vélo. Des liens existent aussi dans la Figure 5.4 représentant des dépendances entre ces éléments (fonctions/fonctions, composants/composants ou fonctions/composants). Les interactions ou liens entre les composants et les fonctions sont représentés dans la partie basse de la Figure 5.4. Chaque fonction de couleur bien déterminée est représentée par un ensemble de liens reliant les composants (les sous-ensembles) du vélo. La fonction de "freiner et arrêter le vélo" (en couleur jaune) est assurée par les liens entre les composants : Poignée de frein, Câble bowen, Patin de frein, Jantes, Roue d'avant et Roue d'arrière.

Guidon	Roue	Système de transmission	Cadre	Selle	Fourche
<ul style="list-style-type: none"> • Rayon de la base du guidon • Longueur de la base du guidon • Diamètre de la base du guidon • Couleur de la base du guidon • Matières utilisées de la base du guidon • Poids de la base du guidon • Forme du kaxon • Matière utilisée dans le kaxon • Poids du kaxon • Volume du kaxon • Matière utilisée dans la lampe • Type de la lampe • Volume de la lampe • Forme des 2 manettes de dérailleur • Couleur des 2 manettes de dérailleur • Nombre de vitesses • Matières utilisées dans les 2 manettes de dérailleur • Poids des 2 manettes de dérailleur • Forme du poignée de frein • Couleur du poignée de frein • Matières utilisées dans le poignée de frein • Poids du poignée de frein 	<ul style="list-style-type: none"> • Rayon extérieur du pneu • Largeur du pneu • Poids du pneu • Durée de la gomme du pneu • Rayon de la jante • Largeur de la jante • Poids de la jante • Couleur de la jante • Matières utilisées pour la jante • Diamètre des rayons • Nombre des rayons • Forme des rayons • Matières utilisées pour les rayons • Couleur des rayons • Type du frein disque 	<ul style="list-style-type: none"> • Hauteur du pédalier • Longueur de la chaîne • Forme de la pédale • Largeur de la manivelle • Matière utilisée pour la manivelle • Couleur du dérailleur avant • Matière du dérailleur avant • Couleur du dérailleur arrière • Matière du dérailleur arrière • Nombre de dents des pignons • Nombre de dents plateaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Couleur du tube de direction • Forme du tube de direction • Matière utilisée pour le tube de direction • Poids du tube de direction • Angle du tube de direction • Diamètre du tube de direction • Couleur du tube de direction • Forme du tube de horizontal • Matière utilisée pour le tube de horizontal • Diamètre du tube de horizontal • Angle du tube de horizontal • Couleur des tubes de Partie mobile • Forme des tubes de Partie mobile • Matière utilisée pour les tubes de Partie mobile • Poids des tubes de Partie mobile • Angle des tubes de Partie mobile • Diamètre des tubes de Partie mobile • Forme mobile • Couleur du tube du pédalier • Matière utilisée pour le tube du pédalier • Poids du tube du pédalier • Angle du tube du pédalier • Diamètre du tube du pédalier • Longueur de la fourche • Espace de la fourche • Matière utilisée pour la fourche • Couleur de la fourche • Poids de la fourche 	<ul style="list-style-type: none"> • Angle d'inclinaison du tube de la selle • Hauteur du tube de la selle • Forme de la selle • Couleur de la selle • Angle du tube de la selle • Épaisseur de la selle • Matières utilisées pour la selle • Matière utilisée pour le tube de la selle • Poids de la selle 	<ul style="list-style-type: none"> • Couleur de la fourche • Matière utilisée pour la fourche • Poids de la fourche • Longueur de la fourche

FIGURE 5.3 – Liste d'attributs des composants du vélo

VISION FONCTIONNELLE



VISION PHYSIQUE

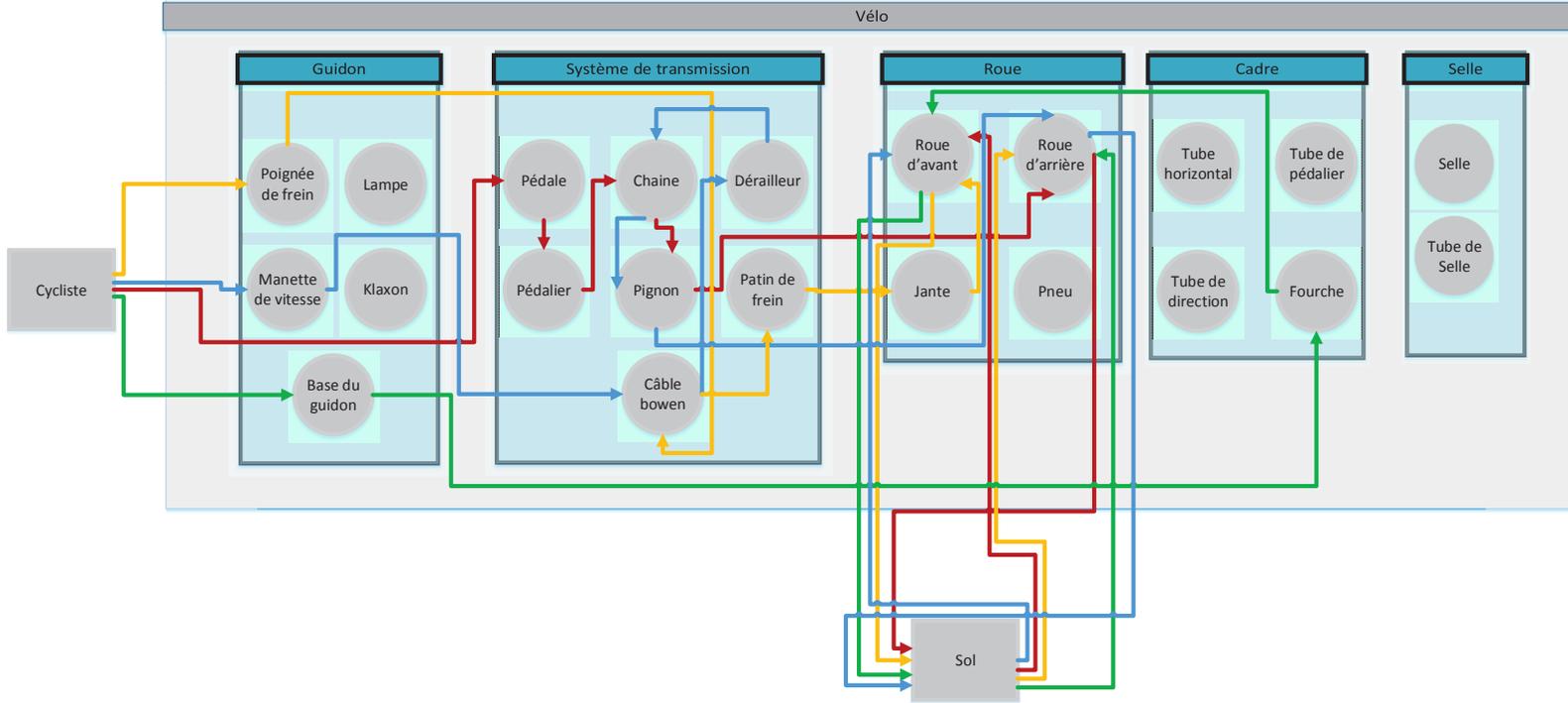


FIGURE 5.4 – Modèles fonctionnel et physique du vélo

5.3 Application de la méthode d'identification (étape par étape)

5.3.1 Étape 1 : La modélisation du système

Le modèle géométrique, réalisé sous un logiciel de conception assisté par ordinateur CATIA, est un modèle d'esquisse (module Sketcher de CATIA) d'un vélo composé de segments et de cercles, voir Figure 5.5.

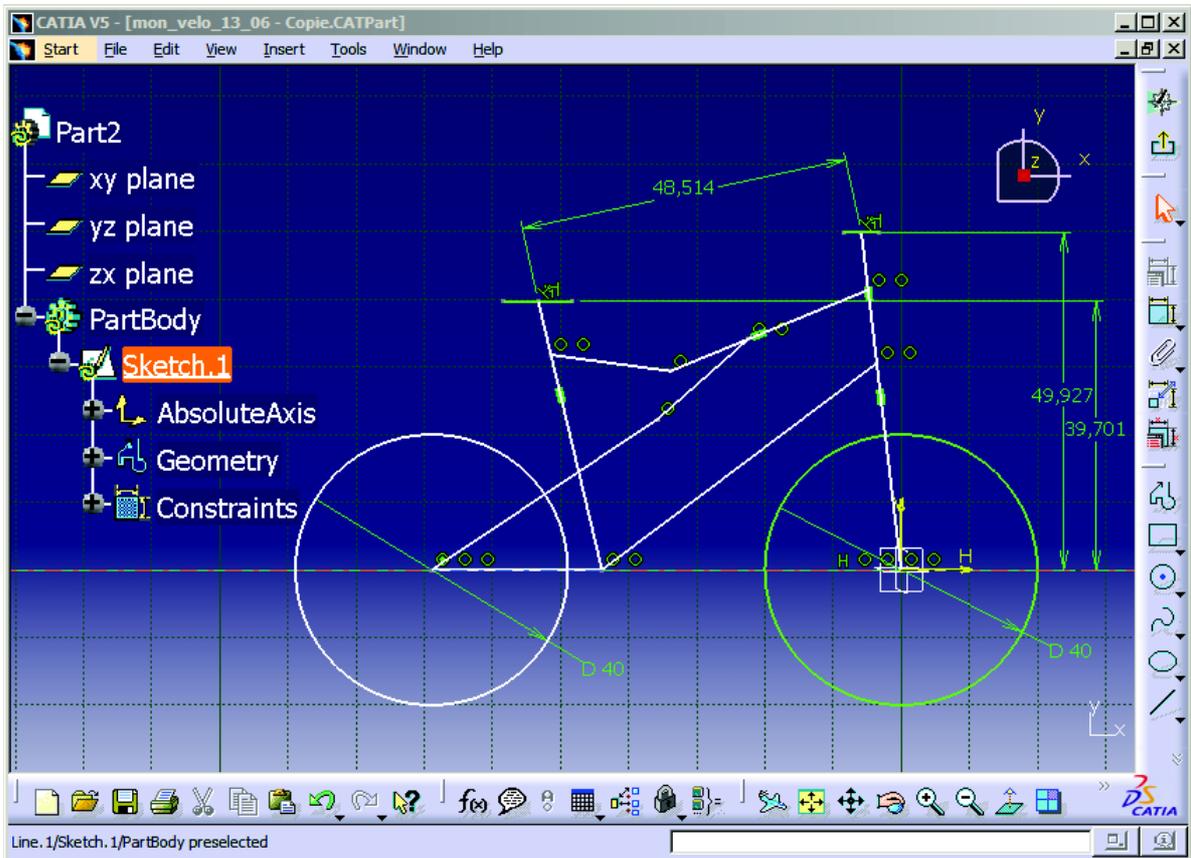


FIGURE 5.5 – Modèle CAO du vélo sous CATIA

Ce modèle contient vingt-quatre paramètres dénotés par $p_i, i \in [1, 24]$, qui peuvent être soit des longueurs L_a en nombre $n_1 = 12$ (*i.e.* $a \in \{1 \dots n_1\}$) soit des angles θ_b en nombre $n_2 = 12$. En effet, dans ce type de modèle, tout segment $i \in [1, 12]$ est caractérisé par sa longueur notée p_i et son angle, noté p_{i+12} relativement à l'axe des abscisses H (comme le montre la Figure 5.6). Le modèle que nous utilisons dans la suite de cette application peut s'écrire comme suit :

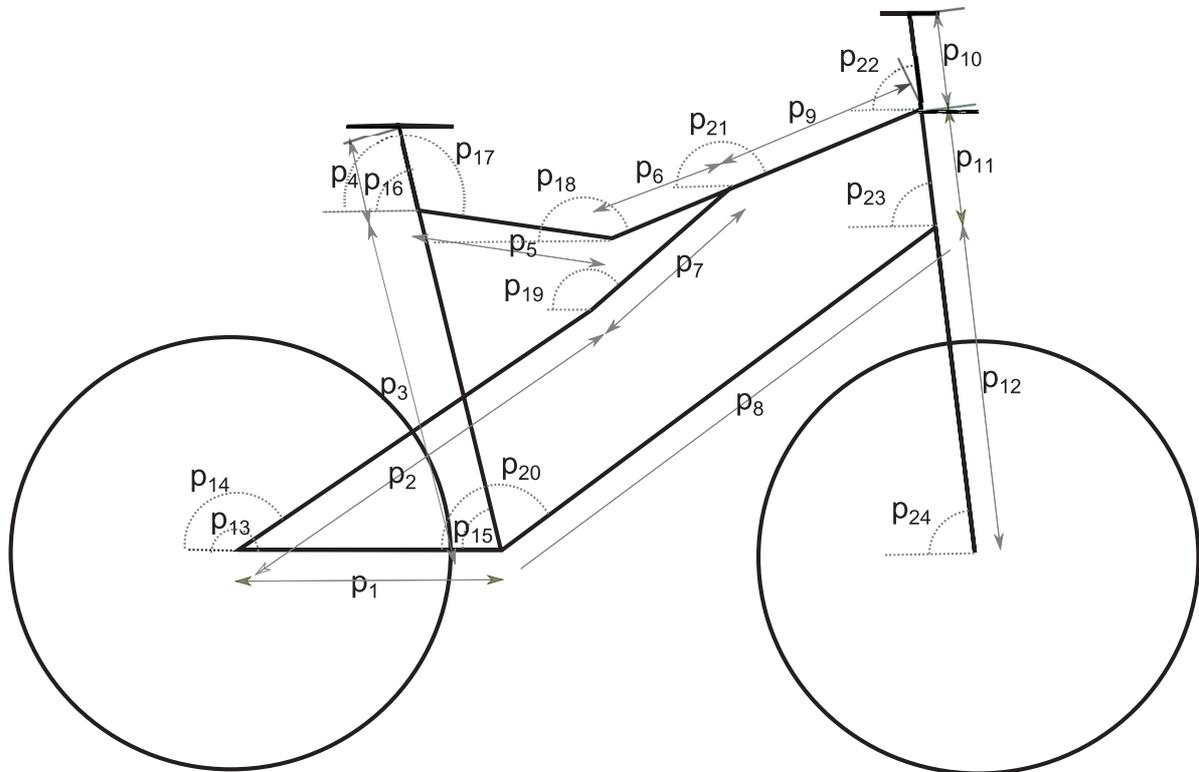
$$\text{Modèle} = p_i, i \in [1, 24] \quad (5.1)$$

Ces paramètres ainsi que leur descriptions sont présentés dans le Tableau 5.1, chaque couple (longueur p_i , angle $p_{i+12}, \forall i \in [1, 12]$) est affecté à un élément du vélo. Par exemple p_1 représente la longueur de la base du cadre. Afin d'obtenir un modèle d'un vélo réalisable (*i.e.* cyclable), nous devons intégrer un certain nombre de contraintes permettant de décrire le fonctionnement attendu ou les bonnes pratiques relatives à la forme d'un vélo dans le modèle. Nous pouvons par exemple citer la distance entre le tube de la selle et le tube de direction qui doit être égale à une certaine valeur pour que le vélo soit confortable à une catégorie d'utilisateurs bien déterminée. Ces contraintes qui doivent être respectées lors de la conception du vélo sont intégrés et traduits dans le modèle géométrique de CATIA.

Deux types de contraintes sont définis donc dans notre modèle géométrique. On retrouve les contraintes structurelles qui sont définies directement dans l'interface du logiciel CATIA en incluant :

TABLEAU 5.1 – Description des paramètres

Élément	Longueur	Angle
Base du cadre	p_1	p_{13}
Haubans	p_2	p_{14}
Tube de selle	p_3	p_{15}
Tige de selle	p_4	p_{16}
Partie gauche du tube horizontal	p_5	p_{17}
Partie centrale du tube horizontal	p_6	p_{18}
Amortisseur	p_7	p_{19}
Tube oblique ou diagonal	p_8	p_{20}
Partie droite du tube horizontal	p_9	p_{21}
Partie haute du tube de direction : tige	p_{10}	p_{22}
Partie centrale du tube de direction	p_{11}	p_{23}
Partie basse du tube de direction : fourche	p_{12}	p_{24}



- trois contraintes de distance entre deux lignes (C_D),
- trois contraintes de concentricité (C_O),
- neuf contraintes de parallélisme (C_P),
- trois contraintes de fixation (C_F)
- dix-neuf contraintes de coïncidence (C_C).

Par exemple, en revenant à l'exemple de satisfaction d'une certaine valeur à la distance entre le tube de la selle et le tube de direction, nous avons défini une contrainte de distance entre les points supérieurs des segments désignant les paramètres p_4 et p_{10} .

On trouve aussi les contraintes de définition, regroupant des contraintes sur les longueurs (C_L) et sur les angles (C_A), qui sont définies en associant, à chaque paramètre de valeur x_i , un intervalle $[\underline{x}_i; \overline{x}_i]$ dans lequel le paramètre peut prendre sa valeur. Néanmoins, ces intervalles ne peuvent pas être directement intégrés dans le modèle **CATIA**; **CATIA** n'offre pas la possibilité pour prendre en charge la définition de dimensions "paramétrique". Pour les intégrer, nous proposons a posteriori une vérification de ces contraintes selon l'algorithme 3 présenté dans l'annexe A du document.

La limite supérieure \overline{x}_i et la limite inférieure \underline{x}_i pour un paramètre p_i sont choisies comme les valeurs limite de chaque paramètre au-delà (en deçà) desquelles le vélo n'est plus réalisable au sens des contraintes de conception. Si l'on considère par exemple la longueur p_2 , sa limite basse \underline{x}_2 correspond à la longueur minimale qui permet d'obtenir un vélo admissible. Le modèle de vélo de la Figure 5.7b où $x_2 = 30 < \underline{x}_2$ génère un vélo infaisable (non cyclable) parce que le pédalier est en chevauchement avec la roue d'arrière ce qui est impossible à réaliser et bloque sa fonction principale "avancer le vélo" (inversement au modèle initial faisable de la Figure 5.7a). Géométriquement la longueur du paramètre p_2 est inférieure au rayon de la roue.

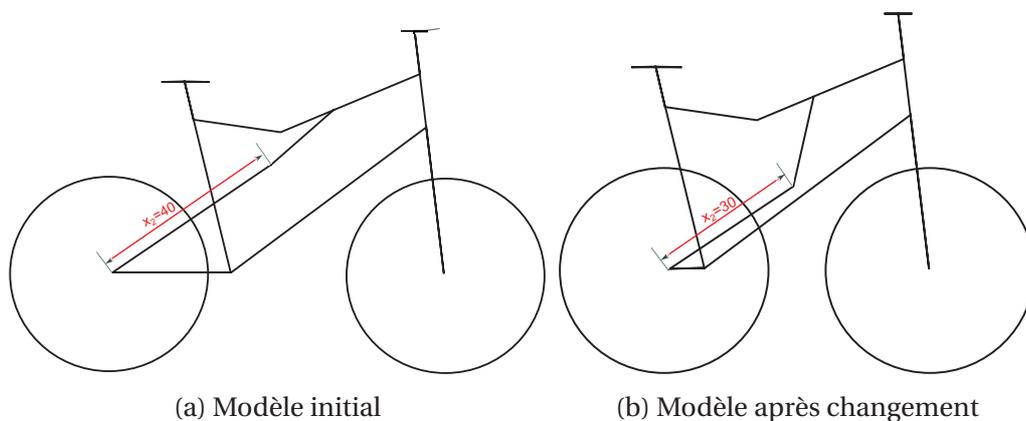


FIGURE 5.7 – Modèle d'un vélo non cyclable

Après la création de ces contraintes, une sauvegarde dans fichier texte des valeurs initiales de différents paramètres (angles et longueurs) qu'on notera par x_i^0 est faite.

5.3.2 Étape 2 : La simulation des changements par variation libre

Dans cette étape de simulation des changements par variation libre, nous modifions la valeur de chacun des n paramètres, l'un après l'autre, et observons l'effet sur les autres paramètres.

On note pas δ_{ik} la $k^{\text{ème}}$ variation appliquée à un paramètre p_i . δ_{ik} peut varier entre la variation minimale $\underline{\delta}_i = x_i^0 - \underline{x}_i$ et la variation maximale $\overline{\delta}_i = \overline{x}_i - x_i^0$.

La variation appliquée sera choisie, de manière discrète, dans l'intervalle $[\underline{\delta}_i, \overline{\delta}_i]$. On introduit pour cela un pas de variation ou un pas d'échantillonnage, noté σ_i , associé au paramètre p_i que l'on souhaite modifier.

Dans cet exemple, on a choisi d'utiliser une discrétisation de l'intervalle $X_i = [\underline{x}_i; \overline{x}_i]$ en fixant le nombre k_i des valeurs successives distinctes avec un pas d'échantillonnage σ_i .

$$k_i = 1 + \frac{\overline{x}_i - \underline{x}_i}{\sigma_i} = 10, \forall i = 1..24 \quad (5.2)$$

Les valeurs échantillonnées (pour chaque échantillon $k \in \llbracket 1, k_i \rrbracket$) s'expriment donc sous la forme $\delta_{ik} = \underline{x}_i + k \times \sigma_i$.

Dans le but d'automatiser la simulation des nombreuses simulations de changements, nous avons mis en place un outil et une macro pour étudier un changement désiré. Cet outil est basé sur la modification du modèle [CATIA](#) et la récolte des nouvelles valeurs des paramètres après changement d'un paramètre instigateur. La macro, à son tour, exécute tous les changements possibles en faisant l'appel aux procédures internes de l'outil de changement en remplissant automatiquement la valeur de delta (qui varie entre la valeur inférieure et supérieure) pour tous les vingt-quatre paramètres.

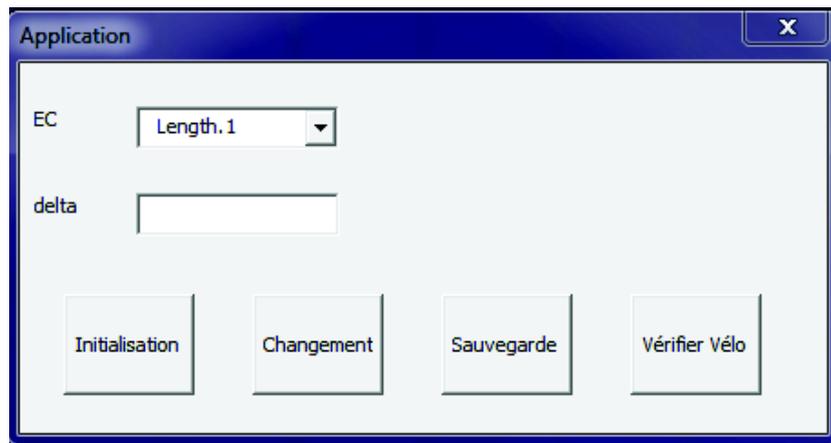


FIGURE 5.8 – Présentation de l'outil de changement développé

Cet outil a été développé en utilisant le langage [Visual Basic \(VB\)](#) pour [CATIA](#). Cette application procède par le changement de la valeur du paramètre sélectionné (EC dans Figure 5.8) de sa valeur initiale x_i^0 à sa nouvelle valeur $\hat{x}_i = x_i^0 + \delta_i$, avec une variation δ_{ik} (*delta* dans Figure 5.8) qui est comprise entre la variation minimale et la variation maximale. La fonctionnalité "initialisation" correspond à l'initialisation du modèle géométrique du vélo dans [CATIA](#), c'est-à-dire, remettre les valeurs initiales aux différents paramètres tout en respectant les contraintes. La fonctionnalité "changement" effectue le changement comme indiqué juste avant (en prenant en compte "EC" et "delta" comme paramètres d'entrées). "Sauvegarde" comme son nom l'indique, sauvegarde les nouvelles valeurs des paramètres après changement. Enfin "Vérifier Vélo" vérifie si le modèle obtenu correspond à un vélo cyclable/réalisable en vérifiant la satisfaction des contraintes de définition. En effet, [CATIA](#) n'est capable que de vérifier si les contraintes de structure sont respectées, pas les contraintes de définition. D'où l'utilité de cette option dans l'application.

5.3.3 Étape 3 : L'identification préliminaire

L'étape précédente de simulation de tous les changements possibles par variation libre permet de récolter toutes les nouvelles valeurs des paramètres avec leurs variations par rapport à la valeur initiale. Ces données sont sauvegardées dans un tableau D tridimensionnel, permettant de conserver pour chaque couple de paramètres (i, j) les variations successives de la valeur du paramètre j en fonction des changements imposés sur le paramètre i en modifiant progressivement sa valeur dans son intervalle de définition avec le pas d'échantillonnage imposé.

A partir de D, la matrice B qui représente la matrice de dépendance binaire montrant l'existence ou non d'une dépendance, peut être obtenue. Le Tableau 5.2 présente la matrice B obtenue sur le cas du vélo, avec $b_{i,j} = 1$ si p_j dépend de p_i alors, 0 sinon. Cette matrice nous donne une première information sur l'existence ou non de dépendance entre deux dimensions différentes. Au total, on trouve 129 coefficients non nul dans cette matrice, ce qui correspond à 129 dépendances au sein du produit.

Nous pouvons distinguer, entre deux paramètres différents i et j , les dépendances simples liant ces paramètres dans une direction unique (de i vers j ou l'inverse) des dépendances telles qu'il existe une dépendance dans les deux sens.

Par exemple, p_1 et p_3 présentent une dépendance simple puisqu'un changement de la valeur de p_1 cause une modification de la valeur de p_3 l'inverse étant faux.

En revanche, une double dépendance existe entre les deux dimensions p_1 et p_4 : changer la valeur de l'un des deux paramètres aura une incidence sur la valeur de l'autre.

On peut tracer le graphe correspondant pour voir les degrés entrants et les degrés sortants des 24 nœuds et identifier les différents prédécesseurs pour chacun des nœuds. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel "Cytoscape" qui permet de caractériser pour chacun des nœuds les propriétés classiques de théorie des graphes, telles que le degré entrant, le degré sortant, *etc.* et de présenter plusieurs layout prédéfinis du graphe de dépendance en lui fournissant comme entrée les matrices de dépendances correspondantes. La figure 5.9 représente le graphe de dépendance correspondant (ou équivalent) à la matrice de dépendance binaire B (modélisant l'existence ou pas de la dépendance entre deux paramètres). Dans ce graphe de layout circulaire, les dépendances sont représentées par des arcs orientés (en couleur noire). La figure 5.10 correspond à une caractérisation qualitative des dépendances identifiées (équivalente à la matrice de dépendance qualitative S). Un arc sortant du nœud p_i et vers le nœud p_j , de couleur verte correspond à une dépendance de signe positif (une variation de la valeur de p_i résulte la même tendance / sens de changement de la variation de la valeur du paramètre p_j), par contre une couleur rouge pour le même arc modélise une variation de sens opposé.

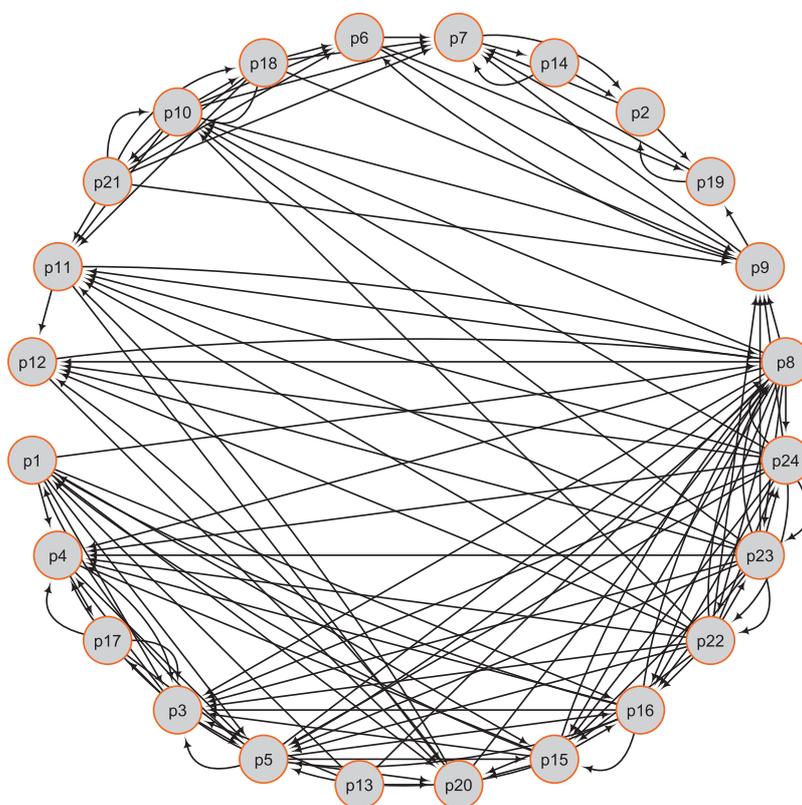


FIGURE 5.9 – Graphe de dépendance binaire

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1			1	1	1			1							1	1				1				
2							1												1					
3				1	1												1							
4			1		1												1							
5	1		1	1				1							1	1					1			
6							1		1										1					
7		1												1										
8			1	1	1				1	1	1	1			1	1						1	1	1
9							1	1											1					
10						1	1		1		1							1				1		
11								1				1									1			
12								1													1			
13	1		1					1													1			
14		1					1																	
15	1		1	1	1			1								1					1			
16	1		1	1	1			1							1						1			
17			1	1	1																			
18						1	1		1	1	1											1		
19		1					1																	
20								1			1	1												
21						1	1		1	1	1							1						
22			1	1	1			1	1	1	1	1			1	1							1	1
23			1	1	1			1	1	1	1	1			1	1						1		1
24			1	1	1			1	1	1	1	1			1	1						1	1	

TABIEAU 5.2 – Matrice de dépendance binaire

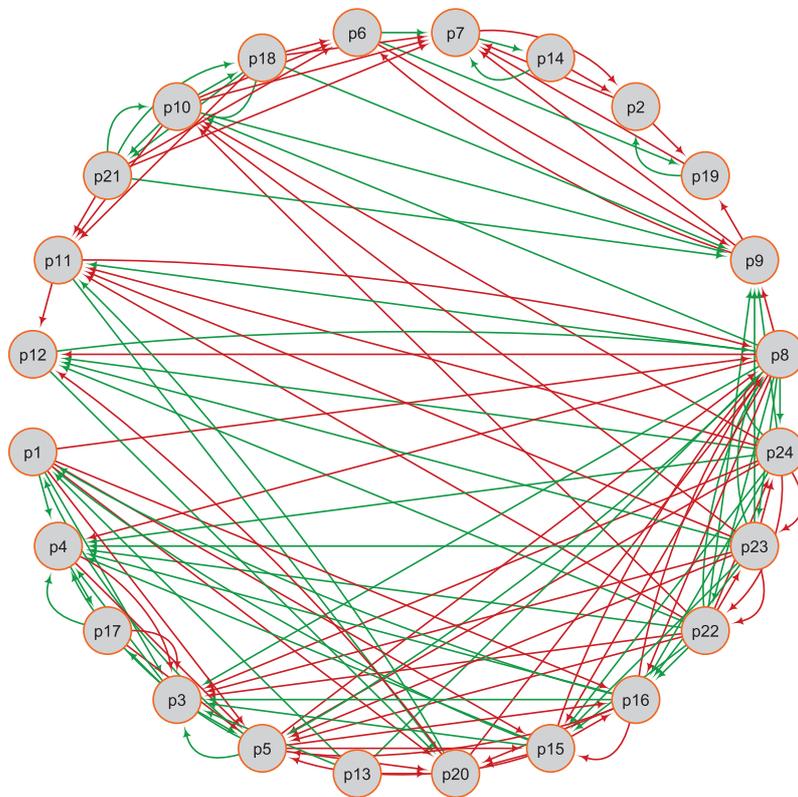


FIGURE 5.10 – Graphe de dépendance qualitatif

5.3.4 Étape 4 : La simulation des changements par variation contrôlée

A ce stade, nous pouvons appliquer la simulation des changements par variation contrôlée.

Il va s'agir alors de considérer les nœuds du graphe, un par un, puis, pour chacun d'eux, de lister ses prédécesseurs pour simuler le changement de chaque prédécesseur, un par un, en fixant les valeurs des autres prédécesseurs à leurs valeurs initiales.

Les différentes hypothèses d'échantillonnage, *i.e.* le pas d'échantillonnage et les valeurs supérieures et inférieures des dimensions, sont les mêmes que celles utilisées dans l'étape 2.

L'outil d'automatisation de la simulation, présenté précédemment, est également utilisé pour réaliser la simulation de changement décrite ici, en modifiant le modèle géométrique [CATIA 2D](#) de manière à bloquer la valeur des paramètres fixés et en recueillant puis sauvegardant les valeurs des variations des paramètres après le changement, dans un tableau G (similaire au tableau D).

Pour chaque dépendance, identifiée à l'étape précédente, entre deux dimensions i et j , il y a alors deux possibilités :

- La dépendance est confirmée (car identifiée de nouveau) et la nouvelle valeur de la variance des nouvelles valeurs du paramètre j obtenue à partir du tableau G, est non nulle (la variance $V_{i,j} \neq 0$)
- La dépendance a disparu (si en changeant la valeur du paramètre i et en maintenant tous les prédécesseurs du nœud j fixes, la valeur paramètre j reste la même et ne varie pas).

L'étape suivante va permettre de caractériser ces dépendances.

5.3.5 Étape 5 : La caractérisation des dépendances

Dans cette étape, la matrice de dépendance binaire B, calculée précédemment, est mise à jour (dans le Tableau 5.2, les dépendances éliminées sont représentées en gris) et les éléments des trois matrices Q, S et F sont calculées à partir du tableau G selon les équations définies dans le chapitre 3.

D'après les résultats de l'étape 4 et pour chaque paramètre instigateur i , nous exprimons la dépendance correspondante sous forme de fonction linéaire ou polynomiale. La Figure 5.11 montre quelques courbes représentatives des dépendances avec une caractérisation du type de dépendance linéaire / polynomiale obtenu. A titre d'exemple, une dépendance double entre p_2 et p_{19} est représentée, les autres pouvant être qualifiées de dépendances simples.

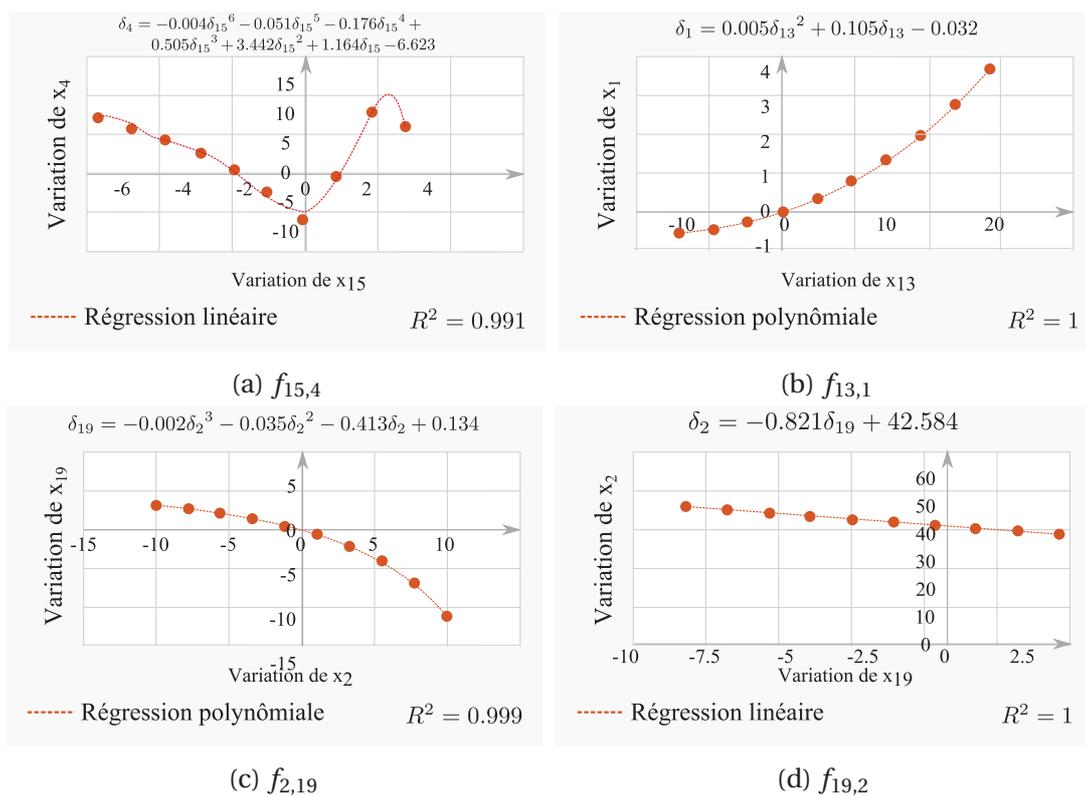


FIGURE 5.11 – Exemples de représentation des dépendances

L'interprétation qualitative peut ici être effectuée de manière graphique en utilisant les Figure 5.11b, Figure 5.11c et Figure 5.11d. La première montre une dépendance croissante tandis que les deux autres représentent une variation décroissante. Concernant la Figure 5.11a, la courbe présentée n'a pas un sens unique de variation.

La fonction de la dépendance, linéaire ou polynomiale, est identifiée grâce à la procédure d'analyse de régression présentée dans le chapitre 3 développée à l'aide d'une macro programmée avec l'application VB dans Excel.

5.3.6 Étape 6 : L'établissement du graphe de dépendance

Pour simplifier la présentation du graphe de dépendance, nous avons décidé d'utiliser des macro-nœuds pour représenter les nœuds ayant les mêmes dépendances avec d'autres nœuds. Tel est le cas du couple (p_{15}, p_{16}) et le triple (p_{22}, p_{23}, p_{24}) . Donc le nombre de nœuds du graphe de dépendance est réduit de vingt-quatre à vingt-et-un. Le nombre de dépendances identifiées précédemment, 129, est maintenant réduit à 42 après la simulation par variation contrôlée. La Figure 5.12a représente donc le graphe de dépendance identifiées par variation libre (dans l'étape 4) avec la considération des macro-nœuds (avec

21 nœuds et 89 dépendances). En même temps, la Figure 5.12b correspond au graphe de dépendance identifiées après l'application du principe de variation contrôlée.

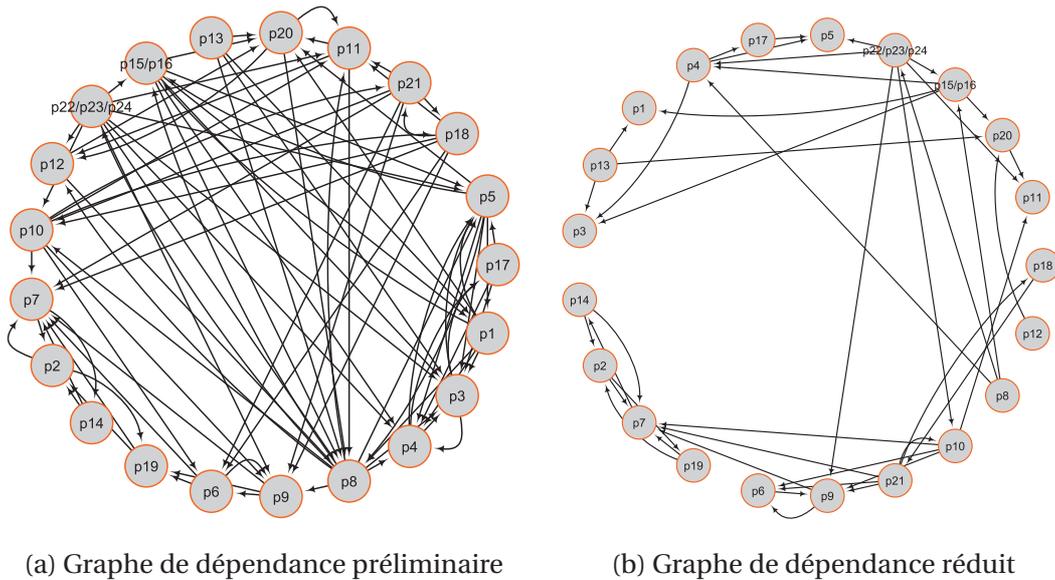


FIGURE 5.12 – Réduction du graphe de dépendance

Chaque dépendance reliant deux paramètres, peut être expliquée par l'existence d'une (ou plusieurs) contrainte(s) déterminée(s). Par exemple, la dépendance identifiée reliant l'angle de la base du cadre p_{13} à la longueur du tube de la selle p_3 est due à la définition d'une contrainte de fixation de la hauteur de la selle qui relie p_3 avec p_{13} .

5.3.7 Différentes technologies utilisés pour l'application de la méthode d'identification des dépendances :

Nous présentons dans la Figure 5.13, une autre schématisation (ou visualisation) de notre méthode d'identification des dépendances en présentant les différentes technologies, langages et outils informatiques utilisés pour son application au cas d'étude. Les six étapes sont aussi mentionnées et liées aux différents outils.

On peut voir clairement que l'outil de simulation de changements ne considère qu'une seule évaluation de changement, alors que la macro en VB pour CATIA évalue tous les changements possibles en répétant la procédure d'évaluation d'impact de changements en plusieurs itérations.

En définissant le changement (entrer les valeurs de EC et de delta dans l'interface graphique de l'outil), la macro de changement (procédure interne développée en langage VB pour CATIA) va communiquer avec l'environnement de CATIA pour ouvrir le fichier CAO. Le modèle géométrique initial du vélo sera ensuite modifié (la valeur du paramètre instigateur sera changée) vers un deuxième modèle par l'une des protocoles de simulation à l'étape 2 (par variation libre) ou à l'étape 4 (par variation contrôlée). Les nouvelles valeurs des paramètres après changements sont sauvegardées dans une base de données brutes. Cette sauvegarde des nouvelles valeurs et leurs variations dans l'une des matrices D (résultats de la simulation libre) ou G (résultats de la simulation contrôlée) correspondent à l'étape 3 de la méthode d'identification. Une autre macro développée en langage VB pour Excel est utilisée pour calculer les dépendances sous les différentes caractérisations; binaire (Matrice B), qualitative (Matrice S), quantitative (Matrice Q) et fonctionnelle (Matrice F). Cette caractérisation des dépendances coïncide avec l'étape 5. Enfin le logiciel "Cytoscape" est utilisé pour la visualisation de ces dépendances caractérisées et la représentation sous forme de graphe de dépendance (étape 6).

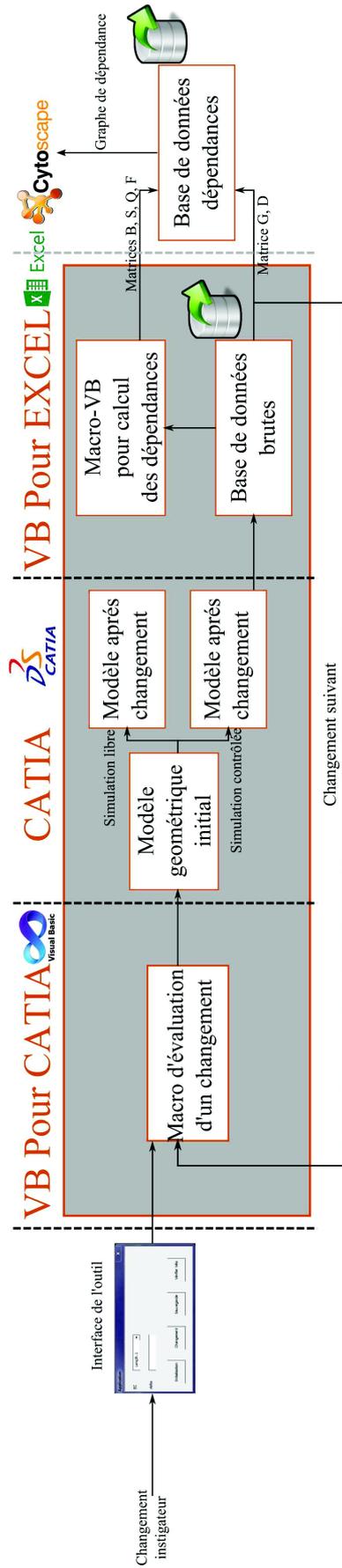


FIGURE 5.13 – Différentes technologies utilisées

5.4 Vérification

Dans cette section, nous vérifions les résultats des fonctions de dépendances identifiés (Matrice de dépendance fonctionnelle F). Ces fonctions polynomiales sont retrouvées par le principe de simulation contrôlée. Nous pensons donc à les comparer aux résultats retrouvés par le principe de la simulation libre. En d'autres termes, nous voulons justifier la réduction du graphe de dépendance (d'un graphe de dépendance $G = (N = 24; V = 129)$ à un graphe $G = (N = 21; V = 42)$ lors du passage de l'étape 2 à l'étape 4 de l'approche d'identification de dépendances proposée.

Comme dit dans le chapitre 3, lors de la simulation contrôlée, nous prenons un paramètre p_j et ensuite nous fixons tous les paramètres qui lui précèdent (prédécesseurs de p_j) sauf un paramètre p_i (qu'on fait varier de sa valeur minimale à sa valeur maximale) et nous répétons cette procédure pour tous les prédécesseurs de p_j , un par un. Dans le cas où le paramètre p_j possède plus de deux prédécesseurs, nous effectuons une agrégation de ses différentes valeurs pour calculer ou estimer la valeur de p_j en se basant sur le théorème de différentielle totale. Donc, il faut vérifier pour chaque nœud que l'agrégation de variations calculées à l'aide de la matrice F (à l'aide de la simulation contrôlée) est égale à la valeur agrégée calculée en utilisant les fonctions de dépendances obtenues par la simulation libre. Pour cela, nous sélectionnons dans le graphe de dépendance, un sous-graphe comportant le nœud d'agrégation, ses prédécesseurs et les arcs qui les relie.

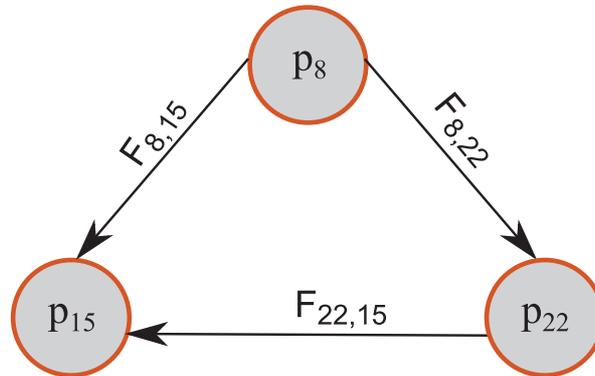


FIGURE 5.14 – Exemple de vérification

Prenons l'exemple d'agrégation du nœud p_{15} où trois nœuds p_8, p_{15} et p_{22} , sont reliés entre eux par trois arêtes, voir la Figure 5.14. Ici, pour des raisons de simplification d'écriture nous utilisons la notation p_{15} pour représenter le macro-nœud du couple (p_{15}, p_{16}) et p_{22} pour représenter (p_{22}, p_{23}, p_{24}) .

La Table 5.3 montre les différentes fonctions polynomiales qui caractérisent les trois dépendances existantes dans les deux types de simulation de changement libre et contrôlée.

TABEAU 5.3 – Résultats d'identification des fonctions pour les deux types de simulation

		Simulation libre de changement	Simulation contrôlée de changement
i	j	$\delta_j = f_{i,j}(\delta_i)$	$\delta_j = f_{i,j}(\delta_i)$
8	15	$\delta_{15} = 2,074\delta_8 + 0,003$	$\delta_{15} = 1,186\delta_8 + 0$
8	22	$\delta_{22} = -1,810\delta_8 - 0,051$	$\delta_{22} = -1,611\delta_8 + 0,002$
22	15	$\delta_{15} = -0,824\delta_{22} + 0,028$	$\delta_{15} = -0,472\delta_{22} + 1,084$

Comme présenté précédemment, nous pouvons calculer α et β les pentes des tangentes aux courbes des fonctions $f_{8,22}$ et $f_{8,15}$, à partir des résultats trouvés lors de l'identification des fonctions pendant l'étape de simulation libre des changements, à l'aide des équations suivantes :

$$\alpha = \left(\frac{dx_{22}}{dx_8} \right)_{x_8 \approx x_8^0} = f'_{8,22}(x_8 = x_8^0) = -1,810 \quad (5.3)$$

$$\beta = \left(\frac{dx_{15}}{dx_8} \right)_{x_8 \approx x_8^0} = f'_{8,15}(x_8 = x_8^0) = 2,074 \quad (5.4)$$

Ensuite, nous pouvons estimer la valeur de β , en utilisant l'équation suivante et les fonctions identifiées lors de l'étape de simulation contrôlé des changements, ce qui donne :

$$\begin{aligned} \hat{\beta} &= \left(\frac{\partial x_{15}}{\partial x_8} \right)_{\substack{x_{15} \approx x_{15}^0 \\ x_8 = x_8^0}} + \alpha \left(\frac{\partial x_{15}}{\partial x_{22}} \right)_{\substack{x_{15} = x_{15}^0 \\ x_{22} \approx x_{22}^0}} = f'_{8,15} + \alpha f'_{22,15} \\ &= 1,186 + (-1,810) \times (-0,454) = 2,039 \approx \beta \end{aligned} \quad (5.5)$$

Cela permet d'exprimer alors l'erreur relative (δ_β) de la valeur de β , qui vaut donc :

$$\delta_\beta = \frac{\hat{\beta} - \beta}{|\beta|} = -0,017 \quad \text{ou} \quad -1,7\% \quad (5.6)$$

On voit que l'existence d'un taux d'erreur est tout à fait raisonnable puisqu'il existe un non-respect des modifications "infinitésimales" des valeurs des paramètres.

Dans l'annexe C, nous avons fourni toutes les erreurs relatives calculées pour les autres paramètres dans le tableau C.1 ainsi que les étapes de calcul dans les équations qui le suivent. Nous pouvons constater que sur les 24 nœuds, seuls 8 ayant une agrégation de plusieurs arcs entrants et doivent être vérifiés (la comparaison entre les fonctions de dépendance obtenues par simulation libre de changement et celles estimées par simulation contrôlée de changement). Les autres nœuds n'ont pas besoin d'une vérification (par exemple, pour p_8 , p_{12} et p_{13}) car ils n'ont pas de prédécesseurs. De plus, la complexité de l'expression de β peut varier d'une vérification de paramètre à une autre en fonction du nombre de nœuds prédécesseurs de chaque nœud. C'est pourquoi, dans certains cas, nous devons utiliser des quantités intermédiaires γ_i . Cet annexe C donne la liste complète de l'expression de β déterminée pour chaque agrégation de paramètres et leurs erreurs relatives. Pour conclure, nous pouvons voir que la grande majorité des valeurs d'erreurs relatives demeurent tout à fait acceptables de moins de 5%. Cependant, il n'y a qu'un seul cas, le nœud p_9 , pour lequel l'erreur relative n'est pas acceptable (c'est-à-dire, 41,62%). Cet écart montre la limite de l'approximation des infinitésimaux utilisés dans la théorie de la différentielle totale.

5.5 Application de la propagation des changements sur le vélo

L'objectif de cette partie est de prendre un changement donné et essayer d'évaluer l'impact de sa propagation sur le reste du produit en appliquant les deux méthodes de propagations proposées dans le chapitre 4. Dans le but d'obtenir un meilleur vélo en termes de stabilité et rigidité, nous avons choisi un changement sur la longueur du tube diagonal. Chaque composant du vélo (représenté par un ou plusieurs paramètres) peut avoir un rôle bien déterminé pour assurer une certaine fonction. Par exemple et selon [WILSON et PAPA-DOPOULOS, 2004], p_1 , p_8 et p_{20} ont un impact direct sur l'élasticité du vélo. Les paramètres p_3 , p_4 , p_{15} et p_{17} imposent des contraintes sur la longueur de bras et des jambes du cycliste ainsi que sur son confort. Les paramètres p_{11} et p_{22} ont des effets sur la précision de conduite.

En regardant de près la structure du vélo dans la Figure 5.15, il s'avère que le tube diagonal relie le tube de direction avec le pédalier. Donc, il doit résister à des forces importantes

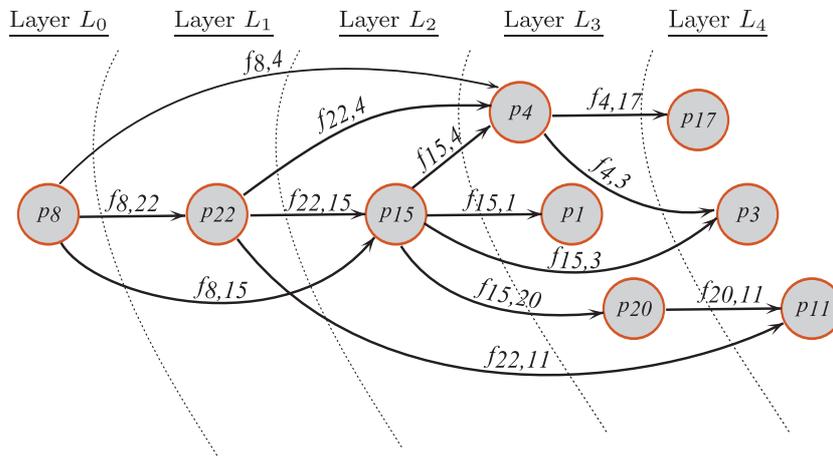


FIGURE 5.15 – Graphe de dépendance de l'étude de cas

à chacune de ses extrémités : d'un côté, la torsion pour tourner le guidon à sa jonction avec le tube de direction et de l'autre côté les forces de pédalage appliquées au pédalier. C'est la raison pour laquelle, il est supposé que ce changement soit demandé aux concepteurs du vélo dans le but d'obtenir un vélo meilleur en termes de stabilité et rigidité.

Afin de simplifier l'étude de propagation, nous avons choisi d'appliquer la deuxième phase de notre approche, de propagation des changements sur un sous-graphe de l'étude de cas du vélo comportant que neuf paramètres (au lieu de vingt-quatre), comme indiqué dans la Figure 5.15. Le reste des paramètres est supposé inchangé. Ces paramètres sont décrits dans le Tableau 5.4 et Figure 5.15 montre le graphe de dépendance qui relie ces neuf nœuds.

TABLEAU 5.4 – Les paramètres du sous-graphe considérés

Paramètre (p_i)	Description
p_1	Longueur de la base du cadre
p_3	Longueur du tube de selle
p_4	Longueur de la tige de selle
p_8	Longueur du tube diagonal
p_{11}	Longueur du tube de direction
p_{15}	Angle du tube de selle
p_{17}	Angle de la partie gauche du tube horizontal
p_{20}	Angle du tube diagonal
p_{22}	Angle de la partie haute du tube de direction

Pour analyser la propagation d'un changement, nous utilisons la matrice de dépendance fonctionnelle F et le graphe de dépendance associé. Le Tableau 5.5 présente un extrait de dépendances fonctionnelles identifiées pour ce modèle, dont les coefficients des fonctions polynomiales sont arrondis à 3 chiffres après la virgule.

Supposons maintenant que la longueur du tube diagonal p_8 soit le paramètre instigateur dont la valeur initiale est $x_8^0 = 50,59cm$. Un changement est défini par la variation de la valeur de ce paramètre de manière à atteindre sa nouvelle valeur $\hat{x}_8 = 51cm$, c'est-à-dire, $\delta_8 = +0,41cm$.

Lors de la propagation d'un changement sur graphe de dépendance pour calculer les nouvelles valeurs des nœuds, nous avons besoin d'utiliser deux opérateurs d'agrégation \oplus et \otimes . Comme indiqué dans le chapitre 4 précédent, et compte tenu de la nature géométrique des paramètres considérés, nous utilisons la composition de fonctions $f \circ g(x)$ comme étant l'opérateur d'agrégation série \otimes . Par contre, et selon la méthode de calcul de propagation utilisée (par couches ou par chemins), nous choisissons l'opérateur d'agrégation

TABLEAU 5.5 – Extrait de la matrice de dépendance fonctionnelle

i	j	$f_{i,j} : \delta_i \rightarrow \delta_j$
8	22	$\delta_{22} = -1,611\delta_8 + 0,002$
8	15	$\delta_{15} = 1,186\delta_8 + 0$
8	4	$\delta_4 = -7,453\delta_8 - 0$
22	15	$\delta_{15} = -0,454\delta_{22} + 1,223$
22	4	$\delta_4 = 0,004\delta_{22}^5 + 0,055\delta_{22}^4 + 0,196\delta_{22}^3 - 0,137\delta_{22}^2 - 2,34\delta_{22} - 3,638$
22	11	$\delta_{11} = 0,008\delta_{22}^2 + 0,103\delta_{22} - 1,049$
15	20	$\delta_{20} = 0,570\delta_{15} - 2,595$
15	1	$\delta_1 = -0,783\delta_{15} + 0,377$
15	4	$\delta_4 = -0,004\delta_{15}^6 - 0,051\delta_{15}^5 - 0,176\delta_{15}^4 + 0,505\delta_{15}^3 + 3,442\delta_{15}^2 + 1,164\delta_{15} - 6,622$
15	3	$\delta_3 = -0,200\delta_{15} + 2,612$
4	3	$\delta_3 = -1,00\delta_4 + 0$
4	17	$\delta_{17} = 3,199\delta_4 + 0,186$
20	11	$\delta_{11} = -0,005\delta_{20}^5 + 0,044\delta_{20}^4 + 0,062\delta_{20}^3 - 0,338\delta_{20}^2 - 4,329\delta_{20} + 3,408$

gation parallèle \oplus comme étant la différentielle totale d'une fonction multi-variable ou la fonction qui prend le maximum d'impact respectivement.

Dans le graphe de propagation de la Figure 5.15, il existe un nœud instigateur p_{20} et quatre nœuds d'arrêt de propagation (feuilles de l'arbre dont la racine est le nœud p_1 correspondant au paramètre instigateur) : p_1, p_3, p_{11} et p_{17} , qui n'ont pas de successeur dans le graphe.

Nous utilisons donc ce sous-graphe dans ce qui suit pour appliquer les deux méthodes de propagations (par chemins et par couches) présentées précédemment dans le chapitre 4.

5.5.1 Méthode de propagation par chemin

En appliquant la méthode de propagation par chemin, nous trouvons 14 chemins de propagation partant de p_8 sur le graphe de dépendance jusqu'aux nœuds d'arrêt de propagation. Le Tableau 5.6 précise ces chemins de propagation, leurs nœuds intermédiaires et les nouvelles valeurs des nœuds après changement. Par exemple, le premier chemin est noté par $\Gamma_1 = \{p_8, p_4, p_{17}\}$ et relie les nœuds p_8 et p_{17} via un autre nœud p_4 . La longueur des étapes de propagation est égale à deux et les nouvelles valeurs de p_4 et p_{17} sont calculées à l'aide de la dépendance fonctionnelle $f_{8,4}$ et $f_{4,17}$ du Tableau 5.5.

5.5.2 Méthode de propagation par couche

Pour appliquer la méthode de propagation par couche, nous commençons par calculer pour chaque nœud, la distance de son plus long chemin partant du nœud instigateur p_8 , dénoté par d_i . Ces distances définissent la couche dont le nœud appartient (correspond au Layer dans la Figure 5.15).

Après avoir changé la nouvelle valeur du nœud instigateur p_8 , nous mettons à jour la valeur des autres nœuds, un par un, classés par ordre croissant de leur distance d_i en utilisant les dépendances fonctionnelles, c'est-à-dire, dans l'ordre : $p_8, p_{22}, p_{15}, p_1, p_4, p_{20}, p_3, p_{11}, p_{17}$. Donc, $d_{22} = 1, d_{15} = 2, d_1 = d_4 = d_{20} = 3$ et $d_3 = d_{11} = d_{17} = 4$. Lorsqu'un nœud possède plusieurs prédécesseurs, une agrégation est nécessaire. Par exemple, le nœud p_{15} a deux prédécesseurs p_8 et p_{22} . En appliquant l'opérateur de différentielle totale, la nouvelle valeur

Paramètre (p_i)	p_1	p_3	p_4	p_8	p_{11}	p_{15}	p_{17}	p_{20}	p_{22}
Valeur initiale (x_i^0)	25	32,63	8,16	50,59	10,90	76,73	172,23	142,87	96,68

Chemin (Γ_c)	Nouvelles valeurs des variations (δ_i)								
$\Gamma_1 = \{p_8, p_4, p_{17}\}$			-3,07	0,41			-9,63		
$\Gamma_2 = \{p_8, p_{22}, p_4, p_{17}\}$			-2,2	0,41			-6,84		-0,66
$\Gamma_3 = \{p_8, p_{15}, p_4, p_{17}\}$			-5,18	0,41		0,49	-16,39		
$\Gamma_4 = \{p_8, p_{22}, p_{15}, p_4, p_{17}\}$			3,51	0,41		1,52	11,4		-0,66
$\Gamma_5 = \{p_8, p_4, p_3\}$		3,07	-3,07	0,41					
$\Gamma_6 = \{p_8, p_{15}, p_3\}$		2,51		0,41		0,49			
$\Gamma_7 = \{p_8, p_{22}, p_4, p_3\}$		2,31		0,41		1,52			-0,66
$\Gamma_8 = \{p_8, p_{22}, p_{15}, p_3\}$		2,31		0,41		1,52			-0,66
$\Gamma_9 = \{p_8, p_{22}, p_{15}, p_4, p_3\}$		-3,51	3,51	0,41		1,52			-0,66
$\Gamma_{10} = \{p_8, p_{15}, p_1\}$	-0,01			0,41		0,49			
$\Gamma_{11} = \{p_8, p_{22}, p_{15}, p_1\}$	-0,82			0,41		1,52			-0,66
$\Gamma_{12} = \{p_8, p_{22}, p_{11}\}$				0,41	-1,11				-0,66
$\Gamma_{13} = \{p_8, p_{15}, p_{20}, p_{11}\}$				0,41	12,46	0,49		-2,32	
$\Gamma_{14} = \{p_8, p_{22}, p_{15}, p_{20}, p_{11}\}$				0,41	10,03	1,52		-1,73	-0,66
Valeurs agrégés $\oplus = max$	24,99	35,7	11,67	51	23,36	78,25	183,6	141,1	96,02

TABLEAU 5.6 – Résultats de la méthode de propagation par chemin

de p_{15} est $\hat{x}_{15} = 77,52cm$ calculé comme suit :

$$dx_{15} = \left(\frac{\partial x_{15}}{\partial x_8} \right)_{x_{22}=x_{22}^0} dx_8 + \left(\frac{\partial x_{15}}{\partial x_{22}} \right)_{x_8=x_8^0} dx_{22} \quad (5.7)$$

Ces dérivées partielles $\left(\frac{\partial x_{15}}{\partial x_8} \right)_{x_{22}=x_{22}^0}$ et $\left(\frac{\partial x_{15}}{\partial x_{22}} \right)_{x_8=x_8^0}$ ne sont que les fonctions dérivées des fonctions de dépendances $f_{8,15}$ et $f_{22,15}$, présentes dans le Tableau 5.5.

En dérivant ces fonctions, on retrouve la valeur agrégée de la variation du paramètre p_{15} , tel que :

$$dx_{15} = (1,186)\delta_8 + (-0,454)\delta_{22} \quad (5.8)$$

Et puisque $\delta_8 = 0,41$ et $\delta_{22} = -0,66$, on retrouve la valeur agrégée du paramètre p_{15} après propagation : $\hat{x}_{15} = x_{15}^0 + dx_{15} = 77,52cm$.

Cette valeur agrégée sert ensuite à calculer les nœuds qui restent (voir Tableau 5.7).

En tenant en compte de la conclusion retenue lors de la comparaison des deux méthodes de propagation (par couche et par chemin), nous pouvons prédire que les résultats de la méthode de propagation par couche sont les plus proches des nouvelles valeurs des paramètres après propagation de changement puisque cette méthode est la plus adéquate aux hypothèses prises en compte. Ces nouvelles valeurs estimées des paramètres peuvent être utilisées plus tard par les concepteurs comme un outil d'aide à la décision.

Paramètre (p_i)
Valeur initiale (x_i^0)

p_1	p_3	p_4	p_8	p_{11}	p_{15}	p_{17}	p_{20}	p_{22}
25	32,63	8,16	50,59	10,90	76,73	172,23	142,87	96,68

Agrégation	Couche (L_c)	Nouvelles valeurs des variations (δ_i)								
$\oplus = diff$	L_0				0,41					
	L_1			-3,07			0,49			-0,66
	L_2			-2,20		-1,11	1,52			
	L_3	-0,24	-3,81	-3,40					-2,15	
	L_4		2,45			11,69		12,38		
	Variations agrégés $\hat{\delta}_i$	-0,24	-3,97	3,81	0,41	9,16	0,79	12,38	-2,15	-0,66
Valeurs agrégés (\hat{x}_i)	24,76	28,66	11,97	51,00	20,06	77,52	184,61	140,73	96,02	

TABLEAU 5.7 – Résultats de la méthode de propagation par couche

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une application de l'approche proposée d'évaluation d'impacts des changements et de leur propagation. L'application a porté sur un modèle géométrique 2D d'un vélo réalisé sous un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur. Cette modélisation nous a permis ensuite à l'aide d'une macro programmée développée en langage VB pour CATIA, de déterminer les différentes dépendances existantes entre les vingt-quatre paramètres du produit et les caractériser sous la forme de dépendances fonctionnelles. Deux types de simulations de changements ont été proposés dans l'approche : la simulation par variation libre et la simulation par variation contrôlée. Le passage d'une simulation par variation libre à une variation contrôlée résulte en une réduction du graphe de dépendance (de 129 nœuds à 42 nœuds uniquement). Une vérification des résultats trouvés suite aux deux simulations a été faite (en fournissant la valeur de l'erreur moyenne de calcul) afin de valider l'utilisation du théorème de différentielle totale. Concernant la deuxième phase de l'approche, nous avons étudié la propagation d'un changement. Nous avons appliqué les deux méthodes de propagation : méthode de propagation par couche et méthode de propagation par chemin à un sous graphe du graphe de dépendance réduit, comportant uniquement neuf parmi les vingt-quatre nœuds. Grâce à l'application de ces méthodes de propagation, nous fournissons donc une estimation de l'impact de la propagation de changement sur le produit par la détermination des nouvelles valeurs de ses paramètres.

Conclusions et perspectives

La conception initiale et le développement d'un nouveau produit sont généralement considérés comme étant des activités difficiles pour les concepteurs qui nécessitent plusieurs efforts (par exemple, des connaissances multidisciplinaires) pour définir à la fin du processus une solution qui répond aux besoins et aux attentes du client. Ceci est le cas aussi de la re-conception ou de l'amélioration d'un produit déjà existant, en apportant des modifications à son modèle actuel (appelés changements d'ingénierie) qui nécessite une gestion adéquate pour avoir des résultats bénéfiques sur le produit en améliorant son coût de revient, sa qualité mais aussi le délai de sa mise sur le marché. La gestion de ces changements d'ingénierie est considérée parmi l'un des processus les plus problématiques (besoin d'évaluer l'impact d'un changement) et compliqués (le changement est propagé dans le reste du produit).

L'objectif principal de cette thèse est de suggérer une nouvelle approche de gestion des changements d'ingénierie (ECM) pour aider les concepteurs et les décideurs à évaluer l'impact d'un changement d'ingénierie apporté à un produit et de prédire sa propagation.

En faisant une synthèse des travaux de recherche en gestion des changements d'ingénierie (ECM), nous constatons qu'un modèle de dépendance est requis pour évaluer l'impact d'un changement et voir sa propagation. Nous avons proposé dans le chapitre 2 une nouvelle classification des modèles de dépendances en deux types : modèle de dépendance a posteriori (utilisé dans la majorité des travaux) et modèle de dépendance théorique (modèle plus détaillé). Chacun des deux présente ses propres avantages et inconvénients. D'une part, le modèle a posteriori est basé sur des données probabilistes utilisant des techniques simples et faciles à manipuler. D'autre part, le modèle théorique est un modèle déterministe offrant plus de détails mais compliqué à avoir en même temps vu les connaissances et l'expertise demandées.

Notre approche se situe dans un contexte de rénovation d'un produit et est constituée de trois phases : (i) Identification de la dépendance (ii) Propagation des changements (iii) Re-conception, pour étudier une demande de changement et évaluer son impact (voir Figure 3.1).

Nous considérons notre approche comme étant une approche mixte utilisant un modèle de dépendance des deux types (a posteriori et théorique). Afin d'identifier et caractériser des dépendances, nous avons utilisé la simplicité des techniques d'une démarche a posteriori, et nous avons fourni les nouvelles valeurs des paramètres (après la propagation des changements) aux travers des équations analytiques (Matrice de dépendance fonctionnelle) comme c'est le cas dans une approche utilisant un modèle théorique.

Dans ce rapport de thèse, nous avons répondu aux trois différentes questions **Q. 1**, **Q. 2** et **Q. 3** déjà posées dans le chapitre 1 d'introduction. Le chapitre 3 répondre aux deux premières questions **Q. 1** et **Q. 2** alors que le chapitre 4 résout la question **Q. 3**. La méthode d'identification de dépendances présentée dans le chapitre 3 et constituée de six étapes, utilise un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) comme étant un outil de construction du support contenant les éléments du produit dépendants entre eux et de simulation des changements. La méthode utilise aussi d'autres outils d'identification tels que les différentielles totales et la régression polynomiale et les matrice DSM pour la caractérisation des dépendances.

La théorie des graphes, à son tour, a été utilisée dans le chapitre 4, qui concerne la deuxième phase de l'approche proposée portant sur la propagation des changements, permettant de répondre à la question Q. 3. Deux méthodes de propagations par couche et par chemin, inspirées des algorithmes de parcours par profondeur et longueur (connues dans le domaine informatique et dans la théorie des graphes) ont été proposées pour parcourir le graphe de dépendance tout en étant adaptées aux hypothèses de notre modélisation des dépendances.

Les principales contributions et apports de nos travaux de recherche sont les suivants :

- La définition des éléments du modèle de dépendance :
Dans la littérature, les méthodes d'ECM modélisent des relations de dépendances entre les éléments du produit. Ces éléments peuvent être de type : composants, assemblages, sous-systèmes, fonctions, *etc.* Dans notre approche, nous avons choisi un niveau plus bas dans la décomposition du produit grâce aux données techniques de sa nomenclature, ainsi le modèle de dépendance relie les différents paramètres des composants du produit.
- La simulation des changements :
La majorité des méthodes en ECM (comme la méthode CPM de CLARKSON et al. [2004]) se servent des interviews faites avec des experts en conception ou de l'historique des changements pour avoir une estimation de la valeur de la dépendance qui relie deux éléments différents du produit. En contrepartie, nous employons une simulation des changements en utilisant une technique de discrétisation des domaines de définition des paramètres et une propagation de ces changements sur le support de simulation construit.
- L'identification des dépendances :
L'identification des dépendances en elle-même (regroupant la définition des éléments du modèle de dépendance et la simulation des changements) peut être considérée aussi comme une contribution de cette thèse, puisque classiquement, dans une méthode de gestion des changements d'ingénierie, l'étape d'identification des dépendances est inexistante et les dépendances sont extraites depuis des informations disponibles des concepteurs.
- La caractérisation fonctionnelle des liens de dépendance :
La caractérisation classique des dépendances est faite dans l'état de l'art soit d'une façon qualitative (signe de variation ou suivant une échelle de type : Forte, Moyenne, Faible) soit quantitativement (une valeur exacte correspondant à la pente de la tangente et dépendante de la valeur initiale). Par contre, la caractérisation fonctionnelle proposée dans cette thèse sous forme de fonctions polynomiales permet aux concepteurs de définir de façon formelle les variations relatives.
- L'agrégation des liens de dépendance :
Dans le cas d'agrégation, c'est-à-dire, la convergence de plusieurs liens de dépendances sur un même paramètre (même nœud), nous avons proposé d'appliquer le théorème de différentielle totale qui est considérée comme une solide théorie mathématique qui permet d'obtenir une approximation de la variation d'un paramètre en fonction de toutes les variations individuelles des autres paramètres dont il dépend deux à deux.
- La propagation des changements :
Les deux algorithmes de parcours de graphe adaptés ici dans cette thèse pour proposer les deux méthodes de propagation (par couche et par chemin) adéquates avec nos hypothèses, n'ont pas été utilisés avant dans le domaine d'ECM pour ce genre de problématiques. De plus, les méthodes de propagation proposées permettent de calculer les nouvelles valeurs des paramètres après propagation (en suivant deux façons différentes de parcours de graphe). Alors que des algorithmes comme celui de

HAMRAZ et al. [2013a] ne permettent que de calculer l'impact direct et indirect (après propagation) entre deux éléments différents du produit, c'est-à-dire, que le nœud instigateur et le nœud affectée sont connus et fixés à l'avance.

Ces travaux de recherche présentent aussi des limitations que nous espérons améliorer dans les travaux futurs et rendre mature la contribution scientifique actuelle. Nous présentons ici les différentes limitations de l'approche proposée et les perspectives possibles permettant de résoudre ces problématiques :

- **Modélisation des dépendances géométrique 2D :**
La modélisation du produit qui a été faite est purement géométrique, permettant de représenter les dépendances géométriques entre les différents paramètres de structure du produit. L'approche d'évaluation d'impact des changements et de sa propagation ne prend en considération que les changements géométriques et leurs effets sur la géométrie du produit. L'une des perspectives les plus intéressantes est de proposer une extension de l'approche à d'autres types de dépendances (et d'autres types de paramètres) autre que la géométrie du produit (*e.g.* propriété de matériau utilisé). De plus, même le modèle géométrique 2D peut être amélioré en ajoutant la troisième dimension de l'espace au support de dépendance, et donc en intégrant d'autre paramètres géométriques (*e.g.* sections des tube dans le cas du vélo) et les identifier les nouvelles dépendances. En tout cas, même si la méthode d'identification des dépendances doit être modifiée pour satisfaire ces nouvelles dépendances, les techniques de propagation restent inchangées et adaptées à ce genre d'extension, puisque la propagation se fait pour un graphe de dépendance quelconque sans tenir en compte la typologie des paramètres sur les nœuds.
- **Complexité de calcul et d'identification :**
Lors de l'application de la méthode d'identification des dépendances, nous avons défini une procédure simple pour effectuer l'échantillonnage (choisir les différentes valeurs des paramètres dans leurs intervalles de définition) pour chacun des changements simulés qui vont être utiles après pour effectuer la régression et identifier la matrice de dépendance fonctionnelle. Pour avoir une meilleure qualité de régression, la solution la plus simple est d'augmenter le nombre d'échantillons (nombre de changements) qui correspond à réduire le pas d'échantillonnage (la différence entre les valeurs de deux échantillons successives) qui est fixe (valeur constante) dans l'application de notre approche. L'idée est donc de proposer, dans des travaux futurs, une nouvelle technique de discrétisation de ces échantillons pour avoir un pas d'échantillonnage variable en fonction du besoin de détails souhaité ou utiliser la théorie des plans d'expériences (pour plus de détails sur les plans d'expérience, voir l'annexe B.2).
- **La complexité du graphe de dépendance :**
En suivant la méthode d'identification des dépendances, et si on se retrouve dans un modèle géométrique avec plusieurs paramètres, le graphe de dépendance peut être complexe à représenter et à analyser. De même, le cas où il existe plusieurs dépendances qui relient les différents paramètres.
Nous pensons dans ce genre de situations à effectuer une technique de filtrage du graphe de dépendance en éliminant quelques nœuds et arcs (par exemple, les arcs dont la valeur de la dépendance est inférieure à une valeur donnée) afin de réduire la complexité du graphe de dépendance et simplifier le calcul de propagation correspondant.
- **Étude de cas :**
L'application de l'approche sur un unique cas d'application, malgré la validation, est considérée comme une limitation. C'est pourquoi, l'une des perspectives de ce travail est également d'appliquer l'approche proposée à des études de cas autre que

celle présentée ici (le vélo). Ceci peut conduire à une synthèse regroupant différents produits classés suivant leurs caractéristiques variées ou leur champ d'application. Dans notre équipe de recherche, une nouvelle thèse vient juste d'être lancée pour consolider cette approche et la rendre plus mature en s'adressant à différentes perspectives citées ci-dessus.

Références

- AIAG. 2012, «Standardized engineering change management process significantly reduces cost and inefficiency. aiag homepage», . 4
- ANSI/EIA-632. 1999, «Processes for engineering a system», . 2, 13, 14
- ANSI/EIA-649. 1998, «National consensus standard for configuration management», . 4, 17, 18
- ASHLEY, S. 1994, «If at first you don't succeed, redesign», *Mechanical Engineering*, vol. 116, n° 3, p. 84. 17
- BÉZIER, P. 1986, «Courbes et surfaces. vol. 4 of séries mathématiques et cao», *Hermes, Paris*. V
- BKCASE, E. B. 2016, *The Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge*, (SEBoK). V. 1.6. R.D. Adcock (EIC). Hoboken, NJ : The Trustees of the Stevens Institute of Technology. Accessed Sept 2016. www.sebokwiki.org. 22
- BLUNTZER, J.-B. 2009, *Intégration des savoir-faire métier produit-process pour une amélioration de la productivité en développement de produits de style*, thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard. 16
- BONDY, J. A. et U. S. R. MURTY. 1976, *Graph theory with applications*, vol. 290, The Macmillan Press Ltd. 23
- BOUIKNI, N., A. DESROCHERS et L. RIVEST. 2006, «A product feature evolution validation model for engineering change management», *Journal of computing and information science in engineering*, vol. 6, n° 2, p. 188–195. V
- BOUIKNI, N., L. RIVEST et A. DESROCHERS. 2008, «A multiple views management system for concurrent engineering and plm», *Concurrent Engineering*, vol. 16, n° 1, p. 61–72. V
- BROWNING, T. R. 2001, «Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems : a review and new directions», *IEEE Transactions on Engineering management*, vol. 48, n° 3, p. 292–306. 23
- CHARPENTIER, F. 2014, *Maîtrise du processus de modélisation géométrique et physique en conception mécanique*, thèse de doctorat, Université de Bordeaux. 15
- CHEN, Y., P. CHENG et J. YIN. 2010, «Change propagation analysis of trustworthy requirements based on dependency relations», dans *The 2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering (ICIME)*, IEEE, p. 246–251. 30
- CHENG, H. et X. CHU. 2012, «A network-based assessment approach for change impacts on complex product», *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 23, n° 4, p. 1419–1431. viii, 21, 24, 25, 26, 29, 33

- CHUA, D. K. et M. A. HOSSAIN. 2012, «Predicting change propagation and impact on design schedule due to external changes», *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 59, n° 3, p. 483–493. [21](#), [33](#)
- CLARK, K. B. et T. FUJIMOTO. 1991, *Product development performance : Strategy, organization, and management in the world auto industry.*, Harvard Business School Press, Boston, Massachusetts. [3](#)
- CLARKSON, P. J., C. SIMONS et C. ECKERT. 2004, «Predicting change propagation in complex design», *Journal of Mechanical Design*, vol. 126, n° 5, p. 788–797. [21](#), [24](#), [28](#), [32](#), [33](#), [34](#), [37](#), [99](#)
- COHEN, T. 1997, *A data approach to tracking and evaluating engineering changes*, thèse de doctorat, Georgia Institute of Technology. [30](#)
- COHEN, T., S. NAVTHE et R. E. FULTON. 2000, «C-far, change favorable representation», *Computer-Aided Design*, vol. 32, n° 5, p. 321–338. [21](#), [24](#), [25](#), [33](#)
- COX, L., H. S. DELUGACH et D. SKIPPER. 2001, «Dependency analysis using conceptual graphs», dans *In Proceedings of the 9th international conference on conceptual structures, ICCS*, p. 117–130. [17](#), [21](#)
- CULVERHOUSE, P. 1995, «Constraining designers and their cad tools», *Design Studies*, vol. 16, n° 1, p. 81–101. [16](#)
- DALE, B. 1982, «The management of engineering change procedure», *Engineering management international*, vol. 1, n° 3, p. 201–208. [19](#)
- DANILOVIC, M. et T. R. BROWNING. 2007, «Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices», *Int. J. of Project Management*, vol. 25, p. 300–314. [23](#)
- DELAMÉ, J. L., J. C. LÉON, M. P. CANI et R. BLANCH. 2011, «Gesture-based design of 2d contours : an alternative to sketching?», dans *Proceedings of the Eighth Eurographics Symposium on Sketch-Based Interfaces and Modeling*, p. 63–70. [40](#)
- DEMOLY, F. 2010, *Conception intégrée et gestion d'informations techniques : application à l'ingénierie du produit et de sa séquence d'assemblage*, thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard - UTBM. [16](#)
- DIETER, G. 2000, «Engineering design-a materials and processing approach», . [16](#)
- DUQUE CICERI, N., M. GARETTI et S. TERZI. 2009, «Product lifecycle management approach for sustainability», dans *Proceedings of the 19th CIRP Design Conference-Competitive Design*. [viii](#), [10](#), [11](#)
- ECKERT, C. M., P. J. CLARKSON et W. ZANKER. 2004, «Change and customisation in complex engineering domains», *Research in Engineering Design*, vol. 15, p. 1–21. [3](#), [29](#), [32](#), [34](#), [57](#)
- EPPINGER, S. D. et T. R. BROWNING. 2012, *Design structure matrix methods and applications*, MIT press. [22](#), [23](#)
- EPPINGER, S. D., D. E. WHITNEY, R. P. SMITH et D. A. GEBALA. 1994, «A model-based method for organizing tasks in product development», *Research in Engineering Design*, vol. 6, n° 1, p. 1–13. [22](#)

- EYNARD, B., T. GALLET, L. ROUCOULES et G. DUCELLIER. 2006, «Pdm system implementation based on uml», *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 70, n° 5, p. 330–342. [17](#)
- FLANAGAN, T. L., C. M. ECKERT, T. EGER, J. SMITH et P. J. CLARKSON. 2003, «A functional analysis of change propagation», dans *DS 31 : Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm*. [24](#), [28](#), [29](#), [31](#), [33](#)
- FRICKE, E., B. GEBHARD, H. NEGELE et E. IGENBERGS. 2000, «Coping with changes : causes, findings, and strategies», *Systems Engineering*, vol. 3, n° 4, p. 169–179. [3](#), [19](#)
- GARDAN, Y. 2002, «Cao : modélisation géométrique», *Techniques de l'Ingenieur*. [15](#)
- GERO, J. S. 1990, «Design prototypes : a knowledge representation schema for design», *AI magazine*, vol. 11, n° 4, p. 26. [28](#)
- GIFFIN, M., O. L. DE WECK, G. BOUNOVA, R. KELLER, C. M. ECKERT et P. J. CLARKSON. 2009, «Change propagation analysis in complex technical systems», *J. Mech. Design*, vol. 131, p. 0810 011–08100 114. [30](#), [33](#), [57](#)
- GONDRAN, M. et M. MINOUX. 1984, *Graphs and algorithms*, Wiley. [23](#)
- HAMRAZ, B., N. H. M. CALDWELL et P. CLARKSON. 2012, «A multidomain engineering change propagation model to support uncertainty reduction and risk management in design», *J. Mechanical Design*, vol. 134, n° 10, p. 100 905–1–14. [24](#), [27](#), [32](#)
- HAMRAZ, B., N. H. M. CALDWELL et P. CLARKSON. 2013a, «A matrix-calculation-based algorithm for numerical change propagation analysis», *IEEE Transactions On Engineering Management*, vol. 60, n° 1, p. 186–198. [21](#), [24](#), [33](#), [37](#), [100](#)
- HAMRAZ, B., O. HISARCIKLILAR et K. RAHMANI. 2013b, «Change prediction using interface data», *Concurrent Engineering : Research and Application*, vol. 21, n° 2, p. 141–154. [21](#), [33](#)
- HAN, S., S. LEE et F. PEÑA-MORA. 2012, «Identification and quantification of non-value-adding effort from errors and changes in design and construction projects», *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 138, n° 1, p. 98–109. [19](#)
- HEIN, P. H. 2015, *Predicting Requirement Change Propagation through Investigation of Physical and Functional Domains*, thèse de doctorat, Florida Institute of Technology. [30](#)
- HUANG, G. Q. et K. L. MAK. 1999, «Current practices of engineering change management in uk manufacturing industries», *International Journal of Operations and Production Management*, vol. 19, n° 1, p. 21–37. [19](#)
- HUYSENTRUYT, J. 2013, *Contribution à Une théorie générale de la conception*, thèse de doctorat, Université Bordeaux I. [12](#)
- IBRAHIM, N., W. M. N. WAN KADIR et S. DERIS. 2011, «An experimental design method for evaluating usability factors of the rechap process model», *International Journal of Innovative Computing*, vol. 1, n° 1. [30](#)
- INNESS, J. G. 1994, *Achieving successful product change : A handbook*, Financial Times/Pitman. [19](#)
- ISO-4210. 2014, «Cycles — exigences de sécurité pour les bicyclettes», . [41](#)
- ISO/IEC-15288. 2002, «Information technology - system life cycle process», . [11](#)

- JARRATT, T., R. KELLER, S. NAIR, C. ECKERT et P. J. CLARKSON. 2004, «Visualization techniques for product change and product modelling in complex design», dans *Diagrammatic Representation and Inference*, édité par A. F. Blackwell, K. Marriott et A. Shimojima, Springer, p. 388–391. [viii](#), [16](#), [19](#), [20](#), [32](#), [34](#)
- JARRATT, T. A. W., C. M. ECKERT, N. H. M. CALDWELL et P. J. CLARKSON. 2011, «Engineering change : an overview and perspective on the literature», *Research in Engineering Design*, vol. 22, n° 2, p. 103–124. [viii](#), [19](#), [20](#), [21](#), [37](#), [V](#)
- JARRATT, T. A. W., C. M. ECKERT, R. WEEKS et P. J. CLARKSON. 2003, «Environmental legislation as a driver of design», dans *14th International Conference on Engineering Design - ICED'03*, édité par A. Folkesson, K. Galen, M. Norell et U. Sellgren, Stockholm, Sweden, p. 231–232. [19](#)
- KARAM, S. 2004, *Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt*, thèse de doctorat, University of Limoges. [VI](#)
- KARNIEL, A. et Y. REICH. 2009, «From dsm-based planning to design process simulation : a review of process scheme logic verification issues», *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 56, n° 4, p. 636–649. [23](#)
- KATAYA, B. 2002, *Modélisation des tolérances géométriques des mécanismes pour leur intégration en conception assistée par ordinateur*, thèse de doctorat, Université de Savoie. [15](#)
- KELLER, R., T. EGER, C. ECKERT et P. J. CLARKSON. 2005, «Visualising change propagation», dans *Proceedings ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design*, vol. DS 35, édité par A. Samuel et W. Lewis, Design Society, Melbourne, Australia, p. 62–63. [21](#), [29](#), [32](#), [33](#), [34](#)
- KIM, S. Y., S. K. MOON, H. S. OH, T. PARK, G. KYUNG et K. J. PARK. 2013, «Change propagation analysis for sustainability in product design», dans *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, IEEE, Bangkok, p. 872–876. [21](#), [29](#), [33](#)
- KOTLER, P., S. H. ANG et C. T. TAN. 1996, *Marketing and Management : An Asian Perspective*, prentice Hall. [viii](#), [11](#)
- KUSIAK, A. et J. WANG. 1995, «Dependency analysis in constraint negotiation», *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 25, n° 9, p. 1301–1313. [viii](#), [21](#), [24](#), [27](#), [30](#), [31](#), [32](#), [33](#), [46](#)
- LEECH, D. et B. T. TURNER. 1985, *Engineering design for profit*, Halsted Press. [19](#)
- LI, Y. et W. ZHAO. 2014, «An integrated change propagation scheduling approach for product design», *Concurrent Engineering : Research and Applications*, vol. 22, n° 4, p. 347–360. [33](#)
- LI, Y., W. ZHAO et Y. MA. 2016, «A shortest path method for sequential change propagations in complex engineering design processes», *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, vol. 30, p. 107–121. [33](#)
- LOCK, S., A. RASHID, P. SAWYER et G. KOTONYA. 1999, «Systematic change impact determination in complex object database schemata», dans *Proceedings of the Workshop on Object Oriented Technology*, édité par A. Moreira et S. Demeyer, Eds. London, UK : Springer, p. 31–40. [30](#)

- LOUHICHI, B. 2008, *Intégration CAO/Calcul par reconstruction du modèle CAO à partir des résultats éléments finis*, thèse de doctorat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir. [V](#)
- MAIER, A. et S. LANGER. 2011, «Engineering change management report 2011 : survey results on causes and effects, current practice, problems, and strategies in denmark», cahier de recherche, Technical University of Denmark (DTU). [4](#)
- MASMOUDI, M., P. LECLAIRE, M. ZOLGHADRI et M. HADDAR. 2015, «Dependency identification for engineering change management (ecm) : An example of computer-aided-design (cad)-based approach», dans *Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15)*, Milan. [30](#)
- MAULL, R., D. HUGHES et J. BENNETT. 1992, «The role of the bill-of-materials as a cad/capm interface and the key importance of engineering change control», *Computing & Control Engineering Journal*, vol. 3, n° 2, p. 63–70. [19](#)
- MELODELIMA, C. 2011, «Dérivées et différentielles des fonctions de plusieurs variables», cahier de recherche, Université Joseph Fourier de Grenoble. [ix](#), [VIII](#)
- MESSAADIA, M. 2008, *Ingénierie système et système de production manufacturière : intégration de l'évolution des exigences dans le PLM*, thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III. [17](#)
- MORGAN, M. S. 1999, «Learning from models», *Models as mediators : Perspectives on natural and social science*, vol. 52, p. 347. [15](#)
- ODUNCUOGLU, A. et V. THOMSON. 2011, «Evaluating the risk of change propagation», dans *DS 68-10 : Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11), Impacting Society through Engineering Design, Vol. 10 : Design Methods and Tools pt. 2, Lyngby/Copenhagen, Denmark, 15.-19.08. 2011*. [33](#)
- OLLINGER, G. A. et T. F. STAHOVICH. 2004, «Redesignit—a model-based tool for managing design changes», *Journal of Mechanical Design*, vol. 126, n° 2, p. 208–216. [19](#)
- OTTO, K. N. et K. L. WOOD. 1998, «Product evolution : a reverse engineering and redesign methodology», *Research in Engineering Design*, vol. 10, n° 4, p. 226–243. [17](#)
- OTTO, K. N. et K. L. WOOD. 2001, *Product design : techniques in reverse engineering and new product development*, Prentice Hall. [16](#)
- PAHL, G. et W. BEITZ. 2007, *Engineering design : a systematic approach*, Springer Science & Business Media. [10](#), [16](#)
- PRASAD, B. 1996, *Concurrent engineering fundamentals*, vol. 1, Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ. [3](#)
- RAFIC, Y. 1993, *Knowledge model for diesel engine with variable nozzle turbocharger in order to optimize or its emissions*, thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, Ecully, FRANCE. [22](#)
- RANJIT, K. R. 2001, *Design of Experiments Using The Taguchi Approach : 16 Steps to Product and Process Improvement*, John Wiley & Sons, Inc. [VI](#)
- ROUBAHA, K. et K. R. CASKEYB. 2003, «Change management in concurrent engineering from a parameter perspective», *Computers in Industry*, vol. 50, p. 15–34. [24](#), [28](#)

- RUTKA, A., M. GUENOV, Y. LEMMENS, T. SCHMIDT-SCHIFFER, P. COLEMAN et A. RIVIERE. 2006, «Methods for engineering change propagation analysis», dans *In Proceedings of 25th congress of the international council of the aeronautical sciences (ICAS)*. viii, 21, 24, 26, 29, 33
- SEBOK, A. 2016, «Form, fit, function, and interface (f3i) (glossary) - guide to the systems engineering body of knowledge (sebok), version 1.7», URL [http://sebokwiki.org/w/index.php?title=Form,_Fit,_Function,_and_Interface_\(F3I\)_\(glossary\)&oldid=45963](http://sebokwiki.org/w/index.php?title=Form,_Fit,_Function,_and_Interface_(F3I)_(glossary)&oldid=45963), [Online; accessed 17 Feb 2017 17 :48 :07 UTC. 2
- STEWART, D. V. 1981, «The design structure system : A method for managing the design of complex systems», *IEEE transactions on Engineering Management*, vol. EM-28, p. 71–74. 33
- TAVČAR, J. et J. DUHOVNIK. 2005, «Engineering change management in individual and mass production», *Robotics and computer-integrated manufacturing*, vol. 21, n° 3, p. 205–215. 21
- TERWIESCH, C. et C. H. LOCH. 1999, «Managing the process of engineering change orders : the case of the climate control system in automobile development», *Journal of Product Innovation Management*, vol. 16, n° 2, p. 160–172. 19
- THIERRY, S. E., P. SCHRECK, P. MATHIS et A. FABRE. 2010, «Utiliser la sous-constriction pour résoudre des systèmes de contraintes géométriques», dans *8^e Conférence Internationale de Modélisation et Simulation (MOSIM'08)*, p. 892–900. 36
- TURKI, S. 2008, *Ingénierie système guidée par les modèles : Application du standard IEEE 15288, de l'architecture MDA et du langage SysML à la conception des systèmes mécatroniques*, thèse de doctorat, Université du Sud Toulon Var. 17
- ULRICH, K. 1995, «The role of product architecture in the manufacturing firm», *Research policy*, vol. 24, n° 3, p. 419–440. 19
- ULRICH, K. T. et S. D. EPPINGER. 2003, *Product design and development*, Tata McGraw-Hill Education. viii, 12, 14
- WATTS, F. 1984, «Engineering changes : a case study», *Production and Inventory Management*, vol. 2, n° 4, p. 55–62. 21
- WILSON, D. G. et J. PAPADOPOULOS. 2004, *Bicycling science*, Mit Press. 31, 91
- WRIGHT, I. C. 1997, «A review of research into engineering change management : implications for product design», *Design Studies*, vol. 18, n° 1, p. 33–42. 19
- WU, Y. et A. WU. 2000, *Taguchi methods for robust design*, American Society of Mechanical Engineers. VI
- XU, X. et A. Y. C. NEE. 2009, *Advanced design and manufacturing based on STEP*, Springer Science & Business Media. 17
- YANG, F. et G. DUAN. 2012, «Developing a parameter linkage based method for searching change propagation paths», *Research in Engineering Design*, vol. 23, n° 4, p. 253–372. 29, 30, 33
- YOU, C. F. et S. N. CHAO. 2009, «Propagation of design change between different cad by using duplicate design procedures», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 44, n° 3-4, p. 330–344. V

- ZHANG, X. 2013, *Contribution to engineering change management in product development projects : reference models and multi-based simulation*, thèse de doctorat, Bordeaux University 1. [viii](#), [13](#), [19](#), [21](#), [29](#), [37](#)
- ZOLGHADRI, M., F. COUFFIN, P. LECLAIRE et S. COLLART-DUTILLEUL. 2014, «Complex systems renewal : positioning, concepts and architectural issues», *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, n° 3, p. 8731–8736. [2](#)

Glossaire

2D Two-Dimensional. 17, 45, 93, 105, 109

3D Three-Dimensional. 17, 45

BFS Breadth First Search. 66

BOM Bill of Materials. 82

C-FAR Change FAVORable Representation. 26, 27

CAO Conception Assistée par Ordinateur. 17, 19, 20, 37, 40, 41, 43, 45, 95, 107

CATIA Computer-Aided Three-Dimensional Interactive Application. 19, 43, 45, 88, 89, 93, 95, 105

CFAO Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur. 19

CPI Change Propagation Index. 31

CPM Change Prediction Method. 20, 26–28, 30, 34

DFS Depth First Search. 66

DMM Domain Mapping Matrix. 25

DSM Design Structure Matrix. 20, 23–26, 28, 30, 108

EC Engineering Change. 20, 21, 95

ECM Engineering Change Management. 2, 11, 20, 21, 23, 26, 31, 32, 34, 35, 107, 108

F3I Form, Fit, Function, and Interface. 2

FBS Function, Behavior, Structure. 29, 30

IC/FBD Inputs in Columns/Feedback Below the Diagonal. 24

IR/FAD Inputs in Row/Feedback Above the Diagonal. 24

ISO International Standards Organization. 45

NRLP Needs, Requirements, Logical solution, Physical solution. 15

PDM Product Data Management. 4

PLM Product Lifecycle Management. 4, 19, 20

TGV Train à Grande Vitesse. 3

TTM Time-To-Market. 3, 4, 34

UML Unified Modeling Language. 19

VB Visual Basic. 89, 93, 95, 105

Annexe A

Algorithmes annexes

Algorithm 3 Overview of algorithm

```
1: Input integer  $n$ ; real  $x_i^0, \underline{x}_i, \overline{x}_i, \sigma_i, \forall i \in \{1, \dots, n\}$  32:
2: Output Matrices  $D, G, A, V, B, Q, S, F$  33:
3: Declare Variables  $i, j, l, i^*, x_i, k_i, P_i[]$ ; 34:
    $\forall i \in \{1, \dots, n\}$ 
4: Begin 35:
5: for each instigating parameter  $i \in \{1, \dots, n\}$  do 36:
6:    $k_i = 10; \forall i = 1 \dots n$  37:
7:    $P_i = \emptyset; \forall i = 1 \dots n$  38:
8:    $\sigma_i = \frac{\overline{x}_i - x_i^0}{k_i - 1}$  39:
9:   for  $k = 1 \dots k_i$  do 40:
10:    for each parameter  $l \in \{1, \dots, n\}$  do 41:
11:      $x_l = x_l^0$  // initialisation of the model by CATIA 42:
12:    end for 43:
13:     $x_i = \underline{x}_i + (k - 1)\sigma_i$  44:
14:    Verify that all parameters  $x_l$  belongs to  $[\underline{x}_l; \overline{x}_l] \forall l \in \{1, \dots, n\}$  45:
15:    for each observable parameter  $j \in \{1, \dots, n\} - \{i\}$  do 46:
16:      $d_{i,j,k} = x_j - x_j^0$  47:
17:    end for 48:
18:  end for 49:
19: end for 50:
20: for each  $(i, j) \in \{1, \dots, n\} \times \{1, \dots, n\}$  do 51:
21:  Compute  $a_{ij}$  and  $v_{ij}$  according to these equations : 52:
22:   $a_{ij} = \frac{1}{k_i} \sum_{k=1}^{k_i} d_{i,j,k}, \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in \{1, \dots, n\}$  53:
23:   $v_{ij} = \frac{1}{k_i} \sum_{k=1}^{k_i} (d_{i,j,k} - a_{ij}), \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in \{1, \dots, n\}$  54:
24:  if  $v_{ij} \neq 0$  then 55:
25:    $b_{ij} = 1$  and  $P_j \leftarrow P_j \cup \{i\}$  56:
26:  else 57:
27:    $b_{ij} = 0$  58:
28:  end if 59:
29: end for 60:
30: for each parameter  $j \in \{1, \dots, n\}$  do 61:
31:  while  $P_j \neq \emptyset$  do 62:
   Select the parameter  $i^*$  one of predecessors of parameter  $j$ 
   for all parameters  $i \in P_j - \{i^*\}$  do
      $x_i = x_i^0$  // Fixate the remaining predecessors value
   end for
   for  $k = 1 \dots k_i$  do
      $x_{i^*} = \underline{x}_{i^*} + (k - 1)\sigma_{i^*}$ 
      $g_{i^*,j,k} = x_j - x_j^0$ 
     Compute  $a_{ij}$  and  $v_{ij}$ 
     if  $v_{ij} \neq 0$  then
        $t_{ij} = 1$ 
       Compute  $R_{ij}^2$ , the coefficient of determination for a linear regression
       while  $R_{ij}^2 < 0.9$  do
          $t_{ij} = t_{ij} + 1$ 
         Compute  $R_{ij}^2$ , the coefficient of determination for a polynomial of degree  $t_{ij}$ 
       end while
       if  $t_{ij} = 1$  then
          $q_{ij} =$  slope of regression line
       else
          $q_{ij} =$  slope of the tangent line
       end if
       if  $(q_{ij} \neq 0)$  then
          $b_{ij} = 1$ 
          $s_{ij} =$  sign of  $(q_{ij})$ 
          $f_{ij} = \{y = \sum_{l=0}^{t_{ij}} a_l x^l\}$ 
       end if
       else
          $q_{ij} = 0, b_{ij} = 0, s_{ij} = 0, f_{ij} = 0$ 
       end if
        $P_j \leftarrow P_j - \{i^*\}$ 
     end for
   end while
   end for
32: End
```

Algorithm 4 Méthode de propagation par couches

- 1: **Variables d'entrée** Graphe $G = (N, E)$, Nombre de nœuds $n = |N|$, Matrice $(n \times n)$ de dépendance fonctionnelle F , Valeurs initiales $X = \{x_i^0, i \in N\}$, Nœud instigateur i_0 , Nouvelle valeur \hat{x}_{i_0} de i_0 , Matrice $(n \times n)$ d'adjacence B
 - 2: **Variables de sortie** Nouvelles valeurs $\hat{X} = \{\hat{x}_i, i \in N\}$, Variations $\Delta = \delta_i, i \in E$
 - 3: **Variables intermédiaires** Indices des nœuds j, k , Indices des couches c , Nombre de couches c_{max}
 - 4:
 - 5: Calculer la longueur d_j du plus long chemin entre i_0 et tout les autres nœuds $j \in N - \{i_0\}$, en termes de nombre de nœuds.
 - 6: $L_c = \emptyset, \forall c \leq c_{max}$ avec $c_{max} = \max(d_j, j \in N)$
 - 7: **for** $j = 1$ **to** N **do**
 - 8: $L_{d_j} \leftarrow L_{d_j} \cup \{j\}$
 - 9: **end for**
 - 10: $c \leftarrow 1$
 - 11: $\delta_{i_0} \leftarrow \hat{x}_{i_0} - x_{i_0}^0$ {Calculer la variation de la valeur du nœud instigateur i_0 }
 - 12: **while** $c \leq c_{max}$ **do**
 - 13: **for each node** $j \in L_c$ **do**
 - 14: $\hat{x}_j \leftarrow$ Agrégation selon \oplus de tout \hat{x}_k tant que $B_{kj} = 1$ {Calculer la nouvelle valeur du nœud j en utilisant la matrice F et remplaçant la valeur de l'agrégateur par l'une des équations (4.8), (4.10), (4.12) ou (4.14)}
 - 15: $\delta_j \leftarrow \hat{x}_j - x_j^0$
 - 16: **end for**
 - 17: $c \leftarrow c + 1$
 - 18: **end while**
-

Algorithm 5 Méthode de propagation par chemins

- 1: **Variables d'entrée** Graphe $G = (N, E)$, Nombre de nœuds $n = |N|$, Matrice $(n \times n)$ de dépendance fonctionnelle F , Valeurs initiales $X = \{x_i^0, i \in N\}$, Listes de valeurs de valeurs d'impact intermédiaires $L = \{l_i[], i = \text{indice du chemin}\}$, Nœud instigateur i_0 , Nouvelle valeur \hat{x}_{i_0} de i_0 , Matrice $(n \times n)$ d'adjacence B
 - 2: **Variables de sortie** Nouvelles valeurs $\hat{X} = \{\hat{x}_i, i \in N\}$, Variations $\Delta = \delta_i, i \in E$, Valeurs d'impact de propagation $V = \{v_i[], i \in N\}$
 - 3: **Variables intermédiaires** indice p , Chemins $c = \{c[i], i =, \text{indice des nœuds}\}$
 - 4:
 - 5: $v_i[] \leftarrow \emptyset, \forall i \in 1, \dots, n$
 - 6: Remplir $L =$ liste des chemins entre le nœud i_0 et les feuilles de l'arbre de propagation en utilisant la matrice B {chaque chemin sera conservé sous forme de tableau contenant la succession des nœuds de i_0 vers la feuille}
 - 7: Trier L par ordre lexicographique {les chemins possédant une partie commune de i_0 vers un nœud i intermédiaire, se succèdent dans cette liste}
 - 8: $prec \leftarrow \emptyset$
 - 9: **for** each path $c \in L$ **do**
 - 10: $p \leftarrow$ dernier nœud de c commun avec $prec$
 - 11: **end for**
 - 12: $\delta_{i_0} \leftarrow \hat{x}_{i_0} - x_{i_0}^0$ {Calculer la variation de la valeur du nœud instigateur i_0 }
 - 13: **for** each node $j \in N$ **do**
 - 14: $\hat{x}_j \leftarrow$ Agrégation selon \oplus de tout les éléments de $v_j[]$ {Calculer la nouvelle valeur du nœud j en utilisant la matrice F et remplaçant la valeur de l'opérateur d'agrégation par l'une des equations (4.8), (4.10), (4.12) or (4.14)}
 - 15: $\delta_j \leftarrow \hat{x}_j - x_j^0$
 - 16: **end for**
-

Annexe B

Outils pour l'identification des dépendances

Dans cet annexe, nous présentons les différents outils et notions qui peuvent aider le lecteur à une meilleure compréhension du rapport. Nous présentons donc quelques outils utilisés pour l'identification des dépendances dans le cas où les dépendances ne sont pas connues d'avance lors de la construction du modèle de dépendances. Les logiciels de CAO permettent de simuler des changements sur un modèle géométrique afin de découvrir les différentes dépendances entre les éléments du modèle. De leurs côtés, des techniques comme les plans d'expérimentation servent à discrétiser les valeurs des éléments à changer à chaque fois. Les analyses de régression et la notion de dérivés partielles sont introduites pour caractériser les dépendances.

B.1 Logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO)

La Conception Assistée par Ordinateur (CAO), désigne l'ensemble des outils logiciels et techniques informatiques permettant aux concepteurs de représenter un produit industriel et d'étudier son fonctionnement virtuellement (sans avoir besoin de le fabriquer) [BÉZIER, 1986].

La CAO permet aussi de réaliser des calculs mécaniques grâce à des techniques de calcul numériques comme la méthode d'éléments finis, la plus utilisée dans les travaux de recherches en génie mécanique. Cette méthode permet de résoudre plusieurs phénomènes mécaniques (comme les problèmes d'élasticités ou de vibrations) dont la formulation se fait grâce à un ensemble d'équations différentielles [LOUHICHI, 2008].

La CAO est une technique parmi d'autres utilisées par les entreprises pour soutenir la prise de décisions au cours du processus de gestion des changements et aider les concepteurs à faire une évaluation initiale de nombreux changements [YOU et CHAO, 2009].

Les logiciels de CAO modernes, tels que CATIA, peuvent prédire l'effet des changements apportés sur un composant en analysant la géométrie du produit et en propageant (recalculant l'écart aux composants voisins) en tenant compte des contraintes imposés dans le modèle [JARRATT et al., 2011].

L'inconvénient principal d'une telle approche (basée sur la CAO) est qu'elle ne peut qu'identifier les implications immédiates d'un changement et les propager géométriquement sans tenir en compte des fonctions du produit.

[BOUIKNI et al., 2006, 2008] créent un modèle basé sur la CAO pour maintenir et préserver la cohérence à travers le produit quand des changements se produisent sur des caractéristiques spécifiques et les diffuser à travers le modèle de sorte que l'impact puisse être caractérisé comme positif ou négatif.

B.2 Techniques de discrétisation : les plans d'expériences

Les plans d'expériences ou (**Design Of Experiment (DOE)**) en anglais, sont des suites ordonnées d'essais d'une expérimentation en changeant un certain nombre de paramètres. La notion (ou la méthode) de plans d'expériences a été développée dans les années 1920 par Roland A. Fisher et a été utilisée dans la rationalisation de l'expérimentation agricole [WU et WU, 2000]. Elle a été utilisée aussi dans d'autres études plus tard en l'appliquant dans d'autres domaines, comme la médecine et la biologie. Des spécialistes en statistiques, telles que Yates, Box et Hunter ont amélioré la méthode de **DOE** et mis au point de nouvelles techniques pour construire un modèle expérimental, y compris les facteurs à deux niveaux [KARAM, 2004].

Dans les années 60, Taguchi a appliqué la notion de **DOE** à l'ingénierie robuste et a tenté de minimiser l'effet de bruit et l'effet contrôlé des facteurs pour bien choisir les paramètres [RANJIT, 2001]. Il a fourni une nouvelle méthode facile à appliquer à l'utilisation des tables de Taguchi. Indépendamment du domaine d'expériences, **DOE** est fréquemment utilisée pour étudier un phénomène avec différents paramètres ou variables. La réponse représente les variables étudiées ou facteurs et les variables d'entrée sont définies comme les variables supposées intendantes sur cette réponse.

Les méthodes classiques reposent généralement le changement de la valeur d'un facteur, en gardant tous les autres inchangés, pour mesurer la réponse à la nouvelle valeur de ce facteur. Cela signifie que, si nous voulons étudier dix facteurs disposant chacun de quatre niveaux/valeurs possibles, nous devons répéter l'expérience $4^{10} = 1048576$ fois. Ce nombre d'expériences peut s'avérer impossible à calculer et analyser. Généralement, il existe deux solutions pour surmonter ce problème, soit en réduisant le nombre d'expériences soit en diminuant le nombre de facteurs. Parce que l'élimination de certains facteurs peut affecter la pertinence des résultats, il vaut mieux minimiser le nombre d'expériences tout en s'assurant d'obtenir des données pertinentes pour la prise de décision. C'est le mécanisme de la méthode **DOE**. Elle contient une séquence ordonnée de tests, de calcul et d'expériences, qui ont l'intention d'acquérir de nouvelles connaissances sur la réponse en contrôlant un ou plusieurs paramètres d'entrée et d'obtenir des résultats jusqu'à la validation du modèle.

B.3 Analyses de régression

La régression est un ensemble de méthodes et de techniques statistiques permettant d'analyser les relations existantes entre une variable et une ou plusieurs d'autres variables. Il existe des analyses de régression permettant de retrouver des modèles qualitatifs ou binaires comme la régression logistique. Mais dans ce rapport, nous restreignons de présenter quelques méthodes quantitatives, voir la régression linéaire et polynomiale.

B.3.1 Régression linéaire simple

La régression linéaire permet de prédire la relation de dépendance (sous forme d'équation linéaire) existante entre une variable continue à prédire généralement notée par y et d'autres variables explicatives notées par x_1, x_2, \dots, x_k . La connaissance de cette relation demande une série de n observations supposées indépendantes afin d'approximer les valeurs des coefficients (b_i) du modèle suivant :

$$Y = b_0 + b_1X_1 + \dots + b_kX_k + E = b_0 + \sum_i^k b_iX_i + E \quad (\text{B.1})$$

Avec

- E est un vecteur de n dimensions représentant le terme résiduel aléatoire ou erreur.
- Y est le vecteur colonne de n dimensions contenant les n observations de la variable à expliquer y.
- X_i est le vecteur colonne de n dimensions contenant les n observations de la variable explicative x_i .

Lorsque le nombre des prédicteurs/ variables explicatives k est égale à 1, nous avons une régression linéaire simple.

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + E \quad (\text{B.2})$$

La résolution de cette équation, *c'est-à-dire* l'identification des valeurs des coefficients b_0 et b_1 , peut se faire selon la méthode des moindres carrés, considérée comme étant la méthode la plus utilisée. Son principe consiste à estimer la relation de y en fonction de x_1 sous forme d'une droite linéaire \hat{y} et rechercher les valeurs des coefficients qui minimisent la somme des carrés des erreurs. Comme indiqué dans la figure B.1, une erreur ϵ est associée à la distance entre les valeurs expérimentales y et la droite de régression \hat{y} pour chaque point du nuage de points. Un coefficient d'ajustement ou de détermination noté

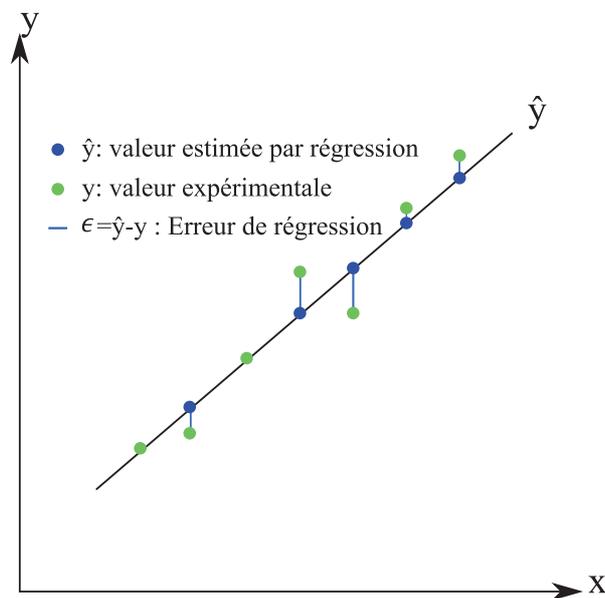


FIGURE B.1 – Exemple de régression linéaire

par R^2 est attribué à la régression, qui mesure la part de variabilité expliquée par le modèle.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=0}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (\text{B.3})$$

Lorsque ce coefficient de détermination R^2 est proche de zéro, ça veut dire que la qualité de régression est inacceptable, par contre une bonne régression implique une R^2 proche de 1.

B.3.2 Régression polynomiale

La régression polynomiale est un autre type de régression pour prédire les relations de dépendances entre une variable à expliquer et une deuxième variable explicative. Le but est d'ajuster un polynôme sur une série de points expérimentaux. Ci-dessous, le modèle d'une régression polynomiale d'une série de n observations :

$$Y = b_0 + b_1 X + \dots + b_k X^k + E = b_0 + \sum_i^k b_i X^i + E \quad (\text{B.4})$$

Avec;

- E est un vecteur de n dimensions représentant le terme résiduel aléatoire ou erreur.
- Y : est le vecteur colonne de n dimensions contenant les n observations de la variable à expliquer y .
- X^i : est le vecteur colonne de n dimensions contenant les n observations de la variable explicative x à la puissance i .

D'autres types de régression existent aussi, comme la régression non linéaire en effectuant une régression par des algorithmes itératifs. On retrouve aussi la régression elliptique qui consiste à retrouver la meilleure ellipse correspondant à un ensemble de points.

B.4 Dérivée et différentielle

Dans cette section, nous présentons les définitions mathématiques de la différentielle totale et la dérivée partielle donnée par [MELODELIMA, 2011].

Dérivée partielle Pour une fonction à valeurs réelles $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ dépendante de deux ou plusieurs variables réelles, la dérivée de f , par rapport à x_1 , en maintenant x_2, x_3, \dots, x_n constantes, est appelée la dérivée partielle de f , par rapport x_1 et notée par : $\frac{\partial f}{\partial x_1}$ ou $\frac{\partial y}{\partial x_1}$.

Différentielle totale Pour une fonction à valeurs réelles $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ dépendante de deux ou plusieurs variables réelles, la différentielle totale est la somme des différentielles partielles à l'égard de toutes les variables indépendantes et donnée par :

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} dx_n \quad (\text{B.5})$$

Pour introduire ce concept, on suppose une fonction à deux variables $y = f(x_1, x_2)$ comme illustré à la Figure B.2. Cette fonction est dérivable par rapport aux deux variables et possède deux dérivées première-partielles : $\frac{\partial y}{\partial x_1}$ et $\frac{\partial y}{\partial x_2}$. Supposons que dx_1 et dx_2 sont les infinitésimaux de x_1 et x_2 . La différentielle totale de f est donnée par :

$$df = df_{x_1} + df_{x_2} = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 \quad (\text{B.6})$$

Géométriquement, cela peut être représenté comme illustré dans la Figure B.2, où la

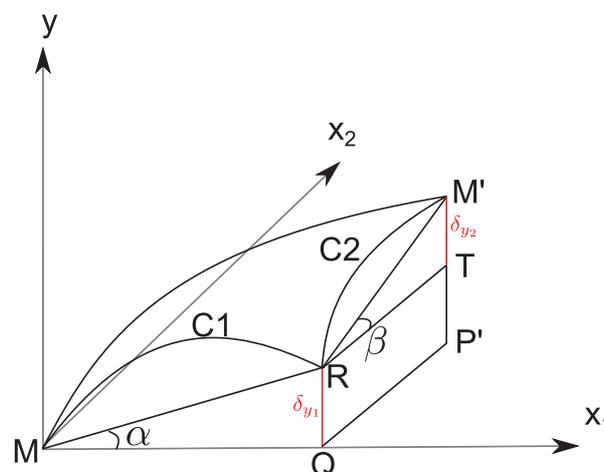


FIGURE B.2 – Interprétation géométrique de la dérivée partielle [MELODELIMA, 2011]

surface S représente la fonction f . La différentielle totale correspond ici à la variation de l'altitude lorsque nous passons du point M à M' . Il s'agit de $\Delta y = P'M'$ selon les petites

variations de x_1 et x_2 . Nous suivons la trajectoire MM' en la décomposant comme suit : $MM' = MR + RM'$. Cela signifie que la première partie est une droite dans le plan (yMx_1) (la variation d'altitude est δ_{y_1}) et la deuxième partie de la trajectoire se fait le long du segment RM' dans un plan parallèle à (yMx_2) , en passant par le point Q. Ce dernier segment représente la variation δ_{y_2} . Par conséquent, la variation totale de y est obtenue par : $\Delta y = \delta_{y_1} + \delta_{y_2}$.

Si maintenant M' est proche de M , donc si R est proche de M et M' à R , alors les lignes droites MR et RM' tendent à représenter les tangentes correspondantes au point M de la fonction f (*c'est-à-dire* la tangente à la surface S dans les plans respectifs). Cela veut dire que les variations tendent à devenir les dérivés de la fonction étudiée relativement à x_1 et x_2 , ou formellement :

$$\delta_{y_1} \rightarrow d_{y_1} = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 \quad , \quad \delta_{y_2} \rightarrow d_{y_2} = \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 \quad (\text{B.7})$$

Enfin, la variation totale Δy , tend vers dy ou df : $\Delta y \rightarrow dy = df$. Par conséquent, la différentielle totale est obtenue par l'équation qui suit, ce qui signifie qu'il est possible de rapprocher la variation totale d'une fonction de deux variables avec des variations partielles (assez petites) de cette fonction selon chacune des variables, pris une par une, en considérant la deuxième variable comme fixe :

$$dy = df = dy_1 + dy_2 = df_{x_1} + df_{x_2} = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 \quad (\text{B.8})$$

Cette conclusion peut être étendue à une fonction $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ de n variables indépendantes réelles :

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} dx_n \quad (\text{B.9})$$

Annexe C

Vérification des résultats de simulation

TABLEAU C.1 – Tableau de vérification

Paramètre	Nombre de Prédécesseurs	Besoin de vérification	δ_β
p_1	2 (p_{13} ; p_{15})	Non	
p_2	2 (p_{14} ; p_{19})	Non	
p_3	3 (p_4 ; p_{13} ; p_{15})	Oui	-3,29%
p_4	3 (p_8 ; p_{15} ; p_{22})	Oui	-4,27%
p_5	3 (p_4 ; p_{17} ; p_{22})	Oui	-0,32%
p_6	3 (p_9 ; p_{10} ; p_{21})	Oui	-5,17%
p_7	6 (p_2 ; p_9 ; p_{10} ; p_{14} ; p_{19} ; p_{21})	Oui	-4.6%
p_8	0	Non	
p_9	4 (p_6 ; p_{10} ; p_{21} ; p_{22})	Oui	-41,62%
p_{10}	2 (p_{21} ; p_{22})	Non	
p_{11}	3 (p_{10} ; p_{22} ; p_{20})	Oui	-5,86%
p_{12}	0	Non	
p_{13}	0	Non	
p_{14}	1	Non	
$p_{15} - p_{16}$	2 (p_8 ; p_{22})	Oui	-1,7%
p_{17}	1	Non	
p_{18}	1	Non	
p_{19}	1	Non	
p_{20}	3 (p_{12} ; p_{13} ; p_{15})	Non	
p_{21}	1	Non	
$p_{22} - p_{23} - p_{24}$	1	Non	

Par la suite les différentes valeurs de β et leurs formules de calcul correspondantes $\hat{\beta}$ pour chaque paramètre p_i .

Paramètre p_3 :

$$\alpha = \left(\frac{dx_4}{dx_{15}} \right)_{x_{15} \approx x_{15}^0} = -0,058 \quad (\text{C.1})$$

$$\beta = \left(\frac{dx_3}{dx_{13}} \right)_{x_{13} \approx x_{13}^0} = 0,484 \quad (\text{C.2})$$

$$\gamma_1 = \left(\frac{dx_1}{dx_{13}} \right)_{x_{13} \approx x_{13}^0} = 0,104 \quad (\text{C.3})$$

$$\gamma_2 = \left(\frac{dx_{15}}{dx_1} \right)_{x_1 \approx x_1^0} = -1,225 \quad (\text{C.4})$$

$$\gamma_3 = \left(\frac{dx_8}{dx_{13}} \right)_{x_{13} \approx x_{13}^0} = 0,217 \quad (\text{C.5})$$

$$\gamma_4 = \left(\frac{dx_{15}}{dx_8} \right)_{x_8 \approx x_8^0} = 2,074 \quad (\text{C.6})$$

$$\hat{\beta} = \left(\frac{\partial x_3}{\partial x_{15}} \right)_{\substack{x_{15} \approx x_{15}^0 \\ x_4 = x_4^0 \\ x_{13} = x_{13}^0}} + \alpha (\gamma_1 \gamma_2 + \gamma_3 \gamma_4) \left(\frac{\partial x_3}{\partial x_4} \right)_{\substack{x_{15} = x_{15}^0 \\ x_4 \approx x_4^0 \\ x_{13} = x_{13}^0}} = 0,468 \quad (\text{C.7})$$

$$\delta_\beta = \frac{\hat{\beta} - \beta}{|\beta|} = -0,033 \quad \text{or } -3,29\% \quad (\text{C.8})$$

Paramètre p_4

$$\alpha = \left(\frac{dx_{22}}{dx_8} \right)_{x_8 \approx x_8^0} = -1,81 \quad (\text{C.9})$$

$$\beta = \left(\frac{dx_4}{dx_8} \right)_{x_8 \approx x_8^0} = 0,108 \quad (\text{C.10})$$

$$\gamma_1 = \left(\frac{dx_{15}}{dx_8} \right)_{x_8 \approx x_8^0} = 2,074 \quad (\text{C.11})$$

$$\hat{\beta} = \left(\frac{\partial x_4}{\partial x_8} \right)_{\substack{x_8 \approx x_8^0 \\ x_{22} = x_{22}^0 \\ x_{15} = x_{15}^0}} + \alpha \left(\frac{\partial x_4}{\partial x_{22}} \right)_{\substack{x_8 = x_8^0 \\ x_{22} \approx x_{22}^0 \\ x_{15} = x_{15}^0}} + \gamma_1 \left(\frac{\partial x_4}{\partial x_{15}} \right)_{\substack{x_8 = x_8^0 \\ x_{22} = x_{22}^0 \\ x_{15} \approx x_{15}^0}} = 0,103 \quad (\text{C.12})$$

$$\delta_\beta = \frac{\hat{\beta} - \beta}{|\beta|} = -0,043 \quad \text{or } -4,27\% \quad (\text{C.13})$$

Paramètre p_5

$$\alpha = \left(\frac{dx_4}{dx_{22}} \right)_{x_{22} \approx x_{22}^0} = -0,064 \quad (\text{C.14})$$

$$\beta = \left(\frac{dx_5}{dx_{22}} \right)_{x_{22} \approx x_{22}^0} = 0,732 \quad (\text{C.15})$$

$$\gamma_1 = \left(\frac{dx_{17}}{dx_4} \right)_{x_4 \approx x_4^0} = 3,212 \quad (\text{C.16})$$

$$\hat{\beta} = \left(\frac{\partial x_5}{\partial x_{22}} \right)_{\substack{x_{22} \approx x_{22}^0 \\ x_4 = x_4^0 \\ x_{17} = x_{17}^0}} + \alpha \left(\frac{\partial x_5}{\partial x_4} \right)_{\substack{x_{22} = x_{22}^0 \\ x_4 \approx x_4^0 \\ x_{17} = x_{17}^0}} + \alpha \gamma_1 \left(\frac{\partial x_5}{\partial x_{17}} \right)_{\substack{x_{22} = x_{22}^0 \\ x_4 = x_4^0 \\ x_{17} \approx x_{17}^0}} = 0,729 \quad (\text{C.17})$$

$$\delta_\beta = \frac{\hat{\beta} - \beta}{|\beta|} = -0,003 \quad \text{or } -0,32\% \quad (\text{C.18})$$

Paramètre p_6

$$\alpha = \left(\frac{dx_9}{dx_{21}} \right)_{x_{21} \approx x_{21}^0} = 0,358 \quad (\text{C.19})$$

$$\beta = \left(\frac{dx_6}{dx_{21}} \right)_{x_{21} \approx x_{21}^0} = -0,48 \quad (\text{C.20})$$

$$\gamma_1 = \left(\frac{dx_{10}}{dx_{21}} \right)_{x_{21} \approx x_{21}^0} = 0,556 \quad (\text{C.21})$$

$$\gamma_2 = \left(\frac{dx_9}{dx_{10}} \right)_{x_{10} \approx x_{10}^0} = 0,848 \quad (\text{C.22})$$

$$\hat{\beta} = \left(\frac{\partial x_6}{\partial x_{21}} \right)_{\substack{x_{21} \approx x_{21}^0 \\ x_9 = x_9^0 \\ x_{10} = x_{10}^0}} + (\alpha + \gamma_1 \gamma_2) \left(\frac{\partial x_6}{\partial x_9} \right)_{\substack{x_{21} = x_{21}^0 \\ x_9 \approx x_9^0 \\ x_{10} = x_{10}^0}} + \gamma_1 \left(\frac{\partial x_6}{\partial x_{10}} \right)_{\substack{x_{21} = x_{21}^0 \\ x_9 = x_9^0 \\ x_{10} \approx x_{10}^0}} = -0,506 \quad (\text{C.23})$$

$$\delta_\beta = \frac{\hat{\beta} - \beta}{|\beta|} = -0,051 \quad \text{or} \quad -5,17\% \quad (\text{C.24})$$

Paramètre p_7

$$\alpha = \left(\frac{dx_{10}}{dx_{21}} \right)_{x_{21} \approx x_{21}^0} = 0,556 \quad (\text{C.25})$$

$$\beta = \left(\frac{dx_7}{dx_{21}} \right)_{x_{21} \approx x_{21}^0} = -5,12 \quad (\text{C.26})$$

$$\gamma_1 = \left(\frac{dx_{14}}{dx_7} \right)_{x_7 \approx x_7^0} = 0,209 \quad (\text{C.27})$$

$$\gamma_2 = \left(\frac{dx_{19}}{dx_2} \right)_{x_2 \approx x_2^0} = -0,39 \quad (\text{C.28})$$

$$A_0 = \left(\frac{\partial x_7}{\partial x_{21}} \right)_{\substack{x_2 = x_2^0 \\ x_9 = x_9^0 \\ x_{10} = x_{10}^0 \\ x_{14} = x_{14}^0 \\ x_{19} = x_{19}^0 \\ x_{21} \approx x_{21}^0}} + \alpha \left(\frac{\partial x_7}{\partial x_{10}} \right)_{\substack{x_2 = x_2^0 \\ x_9 = x_9^0 \\ x_{10} \approx x_{10}^0 \\ x_{14} = x_{14}^0 \\ x_{19} = x_{19}^0 \\ x_{21} = x_{21}^0}} \quad (\text{C.29})$$

$$A_1 = \left(\alpha \left(\frac{\partial x_9}{\partial x_{10}} \right)_{\substack{x_{21} = x_{21}^0 \\ x_{10} \approx x_{10}^0}} + \left(\frac{\partial x_9}{\partial x_{21}} \right)_{\substack{x_{21} \approx x_{21}^0 \\ x_{10} = x_{10}^0}} \right) \quad (\text{C.30})$$

$$A_2 = \left(\frac{\partial x_7}{\partial x_9} \right)_{\substack{x_2 = x_2^0 \\ x_9 \approx x_9^0 \\ x_{10} = x_{10}^0 \\ x_{14} = x_{14}^0 \\ x_{19} = x_{19}^0 \\ x_{21} = x_{21}^0}} \left(\alpha \left(\frac{\partial x_9}{\partial x_{10}} \right)_{\substack{x_{21} = x_{21}^0 \\ x_{10} \approx x_{10}^0}} + \left(\frac{\partial x_9}{\partial x_{21}} \right)_{\substack{x_{21} \approx x_{21}^0 \\ x_{10} = x_{10}^0}} \right) \quad (\text{C.31})$$

$$A_3 = \left(\left(\frac{\partial x_7}{\partial x_2} \right)_{\substack{x_2 \approx x_2^0 \\ x_9 = x_9^0 \\ x_{10} = x_{10}^0 \\ x_{14} = x_{14}^0 \\ x_{19} = x_{19}^0 \\ x_{21} = x_{21}^0}} + \left(\frac{\partial x_{19}}{\partial x_2} \right)_{\substack{x_2 \approx x_2^0 \\ x_9 = x_9^0}} \left(\frac{\partial x_7}{\partial x_{19}} \right)_{\substack{x_2 = x_2^0 \\ x_9 = x_9^0 \\ x_{10} = x_{10}^0 \\ x_{14} = x_{14}^0 \\ x_{19} \approx x_{19}^0 \\ x_{21} = x_{21}^0}} \right) \quad (\text{C.32})$$

$$\begin{aligned}
& A_0 + \left(\frac{\partial x_7}{\partial x_{19}} \right) \begin{array}{l} x_2 = x_2^0 \\ x_9 = x_9^0 \\ x_{10} = x_{10}^0 \\ x_{14} = x_{14}^0 \\ x_{19} \approx x_{19}^0 \\ x_{21} = x_{21}^0 \end{array} \left(\frac{\partial x_{19}}{\partial x_9} \right) \begin{array}{l} x_2 = x_2^0 \\ x_9 \approx x_9^0 \end{array} (A_1 + A_2) \\
\hat{\beta} = & \frac{\left(\frac{\partial x_2}{\partial x_{14}} \right) \begin{array}{l} x_{14} \approx x_{14}^0 \\ x_{19} = x_{19}^0 \end{array}}{1 - \left(\frac{\partial x_2}{\partial x_{19}} \right) \begin{array}{l} x_{14} = x_{14}^0 \\ x_{19} \approx x_{19}^0 \end{array}} A_3 - \gamma_1 \left(\frac{\partial x_7}{\partial x_{14}} \right) \begin{array}{l} x_2 = x_2^0 \\ x_9 = x_9^0 \\ x_{10} = x_{10}^0 \\ x_{14} \approx x_{14}^0 \\ x_{19} = x_{19}^0 \\ x_{21} = x_{21}^0 \end{array} = -0,542 \quad (C.33)
\end{aligned}$$

$$\delta_\beta = \frac{\hat{\beta} - \beta}{|\beta|} = -0,046 \quad \text{or } -4,6\% \quad (C.34)$$

Paramètre p_9

$$\alpha = \left(\frac{dx_{10}}{dx_{22}} \right)_{x_{22} \approx x_{22}^0} = 0,309 \quad (C.35)$$

$$\beta = \left(\frac{dx_9}{dx_{22}} \right)_{x_{22} \approx x_{22}^0} = -0,764 \quad (C.36)$$

$$\gamma_1 = \left(\frac{dx_{21}}{dx_{10}} \right)_{x_{10} \approx x_{10}^0} = 1,78 \quad (C.37)$$

$$\gamma_2 = \left(\frac{dx_{10}}{dx_{21}} \right)_{x_{21} \approx x_{21}^0} = 0,556 \quad (C.38)$$

$$\begin{aligned}
B_0 = (\alpha \gamma_1) & \left(\frac{\partial x_9}{\partial x_{21}} \right) \begin{array}{l} x_{21} \approx x_{21}^0 \\ x_{22} = x_{22}^0 \\ x_{10} = x_{10}^0 \\ x_6 = x_6^0 \end{array} + \left(\frac{\partial x_9}{\partial x_{10}} \right) \begin{array}{l} x_{21} = x_{21}^0 \\ x_{22} = x_{22}^0 \\ x_{10} \approx x_{10}^0 \\ x_6 = x_6^0 \end{array} (\alpha + \alpha \gamma_1 \gamma_2) \quad (C.39)
\end{aligned}$$

$$B_1 = \left(\left(\frac{\partial x_6}{\partial x_{10}} \right) \begin{array}{l} x_{10} \approx x_{10}^0 \\ x_{21} = x_{21}^0 \\ x_9 = x_9^0 \end{array} + (\gamma_1) \left(\frac{\partial x_6}{\partial x_{21}} \right) \begin{array}{l} x_{10} = x_{10}^0 \\ x_{21} \approx x_{21}^0 \\ x_9 = x_9^0 \end{array} \right) \quad (C.40)$$

$$B_2 = \left(\left(\frac{\partial x_6}{\partial x_{10}} \right) \begin{array}{l} x_{10} \approx x_{10}^0 \\ x_{21} = x_{21}^0 \end{array} + (\gamma_1) \left(\frac{\partial x_6}{\partial x_{21}} \right) \begin{array}{l} x_{10} = x_{10}^0 \\ x_{21} \approx x_{21}^0 \end{array} \right) \quad (C.41)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\begin{pmatrix} \frac{\partial x_9}{\partial x_{22}} \\ \frac{\partial x_9}{\partial x_6} \end{pmatrix} \begin{matrix} x_{21} = x_{21}^0 \\ x_{22} \approx x_{22}^0 \\ x_{10} = x_{10}^0 \\ x_6 = x_6^0 \end{matrix} + B_0 + \begin{pmatrix} \frac{\partial x_9}{\partial x_6} \\ \frac{\partial x_9}{\partial x_6} \end{pmatrix} \begin{matrix} x_{21} = x_{21}^0 \\ x_{22} = x_{22}^0 \\ x_{10} = x_{10}^0 \\ x_6 \approx x_6^0 \end{matrix} \times B_1 \times (\alpha + \alpha \gamma_1 \gamma_2)}{1 - \begin{pmatrix} \frac{\partial x_6}{\partial x_9} \\ \frac{\partial x_6}{\partial x_9} \end{pmatrix} \begin{matrix} x_{10} = x_{10}^0 \\ x_{21} = x_{21}^0 \\ x_9 \approx x_9^0 \end{matrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial x_9}{\partial x_6} \\ \frac{\partial x_9}{\partial x_6} \end{pmatrix} \begin{matrix} x_{21} = x_{21}^0 \\ x_{22} = x_{22}^0 \\ x_{10} = x_{10}^0 \\ x_6 \approx x_6^0 \end{matrix} \times B_2} = -0,446 \quad (C.42)$$

$$\delta_\beta = \frac{\hat{\beta} - \beta}{|\beta|} = 0,416 \quad \text{or } 41,62\% \quad (C.43)$$

Paramètre p_{11}

$$\alpha = \left(\frac{dx_{10}}{dx_{22}} \right)_{x_{22} \approx x_{22}^0} = 0,309 \quad (C.44)$$

$$\beta = \left(\frac{dx_{11}}{dx_{22}} \right)_{x_{22} \approx x_{22}^0} = 0,112 \quad (C.45)$$

$$\gamma_1 = \left(\frac{dx_{20}}{dx_{11}} \right)_{x_{11} \approx x_{11}^0} = 0,985 \quad (C.46)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\begin{pmatrix} \frac{\partial x_{11}}{\partial x_{22}} \\ \frac{\partial x_{11}}{\partial x_{10}} \end{pmatrix} \begin{matrix} x_{22} \approx x_{22}^0 \\ x_{10} = x_{10}^0 \\ x_{20} = x_{20}^0 \end{matrix} + \alpha \begin{pmatrix} \frac{\partial x_{11}}{\partial x_{10}} \\ \frac{\partial x_{11}}{\partial x_{10}} \end{pmatrix} \begin{matrix} x_{22} = x_{22}^0 \\ x_{10} \approx x_{10}^0 \\ x_{20} = x_{20}^0 \end{matrix}}{1 - \gamma_1 \begin{pmatrix} \frac{\partial x_{11}}{\partial x_{20}} \\ \frac{\partial x_{11}}{\partial x_{20}} \end{pmatrix} \begin{matrix} x_{22} = x_{22}^0 \\ x_{10} = x_{10}^0 \\ x_{20} \approx x_{20}^0 \end{matrix}} = 0,106 \quad (C.47)$$

$$\delta_\beta = \frac{\hat{\beta} - \beta}{|\beta|} = -0,058 \quad \text{or } -5,86\% \quad (C.48)$$

Paramètre p_{15}

$$\alpha = \left(\frac{dx_{22}}{dx_8} \right)_{x_8^0} = -1,810 \quad (C.49)$$

$$\beta = \left(\frac{dx_{15}}{dx_8} \right)_{x_8^0} = 2,074 \quad (C.50)$$

$$\hat{\beta} = \left(\frac{\partial P_{15}}{\partial P_8} \right) + \alpha \left(\frac{\partial P_{15}}{\partial P_{22}} \right) = 2,039 \quad (C.51)$$

$$\delta_\beta = \frac{\hat{\beta} - \beta}{|\beta|} = -0,017 \quad \text{or } -1,7\% \quad (C.52)$$

Titre : Contribution au développement d'une méthode analytique pour l'identification des dépendances et la propagation des changements d'ingénierie en re-conception de produits

Mots clés : Re-conception, Gestion des changements d'ingénierie, Propagation, Systèmes complexes

Résumé : La gestion des changements d'ingénierie, appelée aussi ingénierie du changement, est un domaine de recherche qui s'intéresse à l'étude des changements et des modifications apportés par les concepteurs industriels sur un produit durant l'une des phases de son cycle de vie. Ces changements peuvent exister dans le cadre de renouvellement d'un produit dans un but d'amélioration ou de re-conception. Dans la littérature, plusieurs méthodes et outils ont été mis en place pour évaluer l'impact d'un changement en utilisant les dépendances existantes entre les éléments d'un produit, prédire de façon efficace la propagation du changement et évaluer ensuite ses conséquences possibles. Mais aucun d'entre eux n'a tenté de caractériser la relation de dépendance sous la forme d'une fonction polynomiale,

en plus des caractérisations classiques par valeurs qualitatives et quantitatives. Nous proposons donc, une nouvelle méthode pour générer les variations possibles d'un changement, afin de modéliser ces variations par paire sous formule analytique, d'étendre les variations par paire aux variations de plusieurs variables et de vérifier formellement la cohérence des résultats obtenus. Visuellement, un graphe de dépendance est construit où les noeuds représentent les éléments de produit et les arcs portent les fonctions qui les relient. Nos résultats montrent que cette caractérisation fonctionnelle de la dépendance est instructive et permet une propagation de changement et une évaluation efficace. Un modèle géométrique 2D d'un vélo est utilisé pour illustrer l'approche proposée.

Title : Contribution to the development of an analytical method for dependencies identification and engineering changes propagation for product re-design

Keywords : Redesign, Engineering Change Management, Propagation, Complex system

Abstract : Engineering Change Management, also known as Change Engineering, is the research domain that focuses on the study of changes and modifications brought by industrial designers on a product during one of the phases of its life cycle. These changes can exist in the case of product renewal for improvement or re-design. In the literature, several methods and tools have proposed to assess the change impact using the existing dependencies between the product components, predict effectively the change propagation and then evaluate its possible consequences. However, none of them attempted to characterize the dependency relationship in the form of a polynomial function in addition to the qualita-

tive and quantitative values. Therefore, we propose, a new method to generate change variations, in order to model these variations in pairs with an analytical formula, expand the variations in pairs to changes in several variables and formally check the consistency of the results obtained. Visually, a dependency graph is constructed where nodes represent the components of product and edges are the functions that connect them. Our results show that this functional characterization of dependency allows an effective assessment of change propagation. A bike with 2-D geometric model is used to illustrate the proposed approach.