

Modularité de produit et complexité manufacturière

Par

Pascale Alison MEKAZI MOKUE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAITRISE EN GENIE DES RISQUES EN SANTÉ ET SECURITÉ DU
TRAVAIL
M.Sc.A.

MONTRÉAL, LE 6 AOÛT 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Pascale Alison Mekazi Mokue, 2025



Cette licence [Creative Commons](#) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Antoine Tahan, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Lucas Hof, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Yvan Beauregard, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Amin Chaabane, membre du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 31 JUILLET 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Ce mémoire représente un grand accomplissement dans mon parcourt académique. Après l'obtention de mon diplôme d'ingénieur en Génie industriel au Cameroun et les années d'expériences cumulées, le retour aux études est un tournant décisif pour l'orientation de ma carrière professionnelle. Mon projet de maîtrise traite deux thématiques omniprésentes au sein de l'industrie manufacturière : la modularité et la complexité d'une ligne d'assemblage. Au départ ce sujet m'était totalement inconnu. Cependant, au cours des 5 sessions qui se sont écoulées, j'ai trouvé en cela un grand intérêt qui a aujourd'hui une influence significative sur mes choix de carrière.

Les métriques quantitatives permettent d'évaluer objectivement et de comparer différentes lignes manufacturières. Elles facilitent la conception modulaire, optimisent les opérations, identifient les zones à améliorer, justifient les choix techniques, maîtrisent les coûts liés à la complexité, et soutiennent les démarches d'amélioration continue.

REMERCIEMENTS

Ce mémoire marque l'aboutissement d'un parcours riche en apprentissages, tant académiques qu'humains. Je tiens à exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

J'adresse tout d'abord ma profonde reconnaissance à l'endroit de mes directeurs de mémoire, Antoine Tahan et Lucas Hof pour avoir retenu ma candidature pour le projet, pour leur patience lorsque j'étais en proie au découragement, leur disponibilité pour nos séances de travail aux sortir desquels je repartais toujours satisfaite, leurs conseils tant sur le plan académique que social dès la première rencontre, leur rigueur scientifique et leur accompagnement tout au long de ce projet.

Ce travail a été soutenu par BRP et MITACS dans le cadre du programme Accélération, qui a fourni les financements et les ressources essentiels à la réussite de ce projet. Ma sincère gratitude au partenaire industriel pour son précieux soutien et sa collaboration tout au long de cette recherche. Mes remerciements vont également à toute l'équipe de la stratégie manufacturière spécialement à madame Eveline Lapointe et monsieur Guy Gervais qui ont été des acteurs majeurs dans la réalisation de ce projet.

À ma famille du Canada et celle du Cameroun, pour tout le soutien et les encouragements qu'ils m'ont apporté durant ma maitrise.

Modularité de produit et complexité manufacturière

Pascale Alison MEKAZI MOKUE

RÉSUMÉ

La modularité apparaît comme une solution pertinente pour maîtriser la complexité croissante des produits et des systèmes de production. Elle favorise la flexibilité et le respect de l'environnement. Les entreprises recherchent des outils capables de mesurer le degré de la modularité, pour comparer entre conceptions différentes et pour localiser les zones où la complexité d'assemblage est la plus marquée dans le but d'orienter et prioriser les actions correctives. Cette étude vise à développer des indicateurs permettant d'évaluer le niveau de modularité d'un produit et la complexité d'une ligne d'assemblage d'un produit. Elle s'appuie d'abord sur une revue de la littérature pour établir les fondements théoriques. Ensuite, de nouvelles mesures de modularité et de complexité sont proposées et testées empiriquement sur des procédés d'assemblage, fictifs et réels. Enfin, les résultats obtenus sont validés à travers des analyses de corrélation entre le classement proposé par les métriques et celui fournis par les experts. Les tests réalisés sur la modularité révèlent une forte corrélation atteignant 97,3% pour les cas d'étude simples et 90% pour les cas complexes. Les produits existants comparés entre eux ont également produit le classement escompté. En revanche, les indicateurs de complexité affichent des indices de corrélation insuffisants à l'exception du modèle multiplicatif qui obtient un niveau de 45%, une performance jugée insuffisante pour son adoption opérationnelle.

Mots clés : modularité, complexité, système de production

Product modularity and manufacturing complexity

Pascale Alison MEKAZI MOKUE

ABSTRACT

Modularity has emerged as a relevant approach to managing the increasing complexity of products and production systems. It promotes flexibility and supports environmental sustainability. In this context, companies seek reliable tools to assess the degree of modularity to compare different designs and identify areas with high assembly complexity, thereby guiding and prioritizing corrective actions. This study aims to develop indicators for evaluating both the modularity level of a product and the complexity of its assembly line. The approach begins with a literature review to establish the theoretical foundations. Then, new metrics for modularity and complexity are proposed and empirically tested on both hypothetical and real assembly processes. Finally, the results are validated through correlation analyses between the rankings generated by the metrics and those provided by domain experts. Tests on modularity show strong correlations, reaching 97.3% for simple case studies and 90% for complex ones. Comparisons among existing products also yielded the expected rankings. However, the proposed complexity indicators show insufficient correlation levels, except for the multiplicative model, which achieved a 45% correlation—considered inadequate for operational adoption.

Keywords: modularity, complexity, production systems

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	7
1.1 La complexité des systèmes manufacturiers	7
1.1.1 Définition de la complexité manufacturière	7
1.1.2 Domaine d'application et types de complexité	9
1.1.3 Sources de la complexité dans les systèmes manufacturiers	10
1.1.4 Stratégie de gestion de la complexité.....	12
1.2 L'approche modulaire.....	12
1.2.1 Définition et principes.....	12
1.2.2 Architecture modulaire	13
1.2.3 Enjeux de la modularité	20
1.2.4 Les inconvénients de la modularité.....	24
1.3 Les métriques de la modularité du procédé manufacturier	25
1.3.1 Indice de modularité à valeurs singulières.....	26
1.3.2 Indice d'indépendance intermodules	26
1.3.3 Indice de modularité du réseau	27
1.3.4 Indice de Newman et Girvan	27
1.3.5 Indice de Modrak et Soltysova	28
1.3.6 Indice optimal de la structure de conception	28
1.4 Les métriques de complexité	29
1.4.1 Mesure par la dynamique non linéaire.....	29
1.4.2 Mesure par la théorie de l'information	30
1.4.3 Mesure par l'indice de complexité.....	32
1.4.4 Mesure par une représentation vectorielle dans l'espace euclidien	34
1.4.5 Mesure par l'architecture du produit.....	35
1.5 Conclusion	41
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE.....	43
2.1 Méthodologie de mesure de la modularité.....	43
2.1.1 Justificatif du choix des indices de modularité	43
2.1.2 Proposition d'un nouvel indice de modularité	47
2.1.3 Nomenclature et paramètres de la modularité	49
2.1.4 Validité du nouvel indice de modularité	53
2.1.5 Méthode de collecte d'analyse des données	55
2.2 Méthodologie de mesure de la complexité manufacturière	56
2.2.1 Considérations et nomenclature	57
2.2.2 Pondération des paramètres de complexité	59
2.2.3 Métriques de complexité proposées.....	61
2.2.4 Étude des fonctions de complexité et choix du meilleur descripteur.....	63

CHAPITRE 3	ÉTUDE DE LA MODULARITÉ	65
3.1	Test du nouvel indice de modularité aux cas d'étude fictifs.....	65
3.2	Application aux produits réels	70
3.3	Conclusion	71
CHAPITRE 4	ÉTUDE DE LA COMPLEXITÉ	73
4.1	Comportement des fonctions de complexité	73
4.2	Application des métriques et choix du meilleur descripteur.....	74
4.3	Conclusion	76
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		79
RECOMMANDATIONS		81
ANNEXE I	RÉSUMÉ DE L'ARTICLE PRÉSENTÉ AU CONGRÈS DE LA CSME 2025.....	83
ANNEXE II	AFFICHE PRÉSENTÉ AU CONGRÈS DE L'ACFAS 2025.....	84
ANNEXE III	FEUILLE DE CALCUL DE L'INDICE DE MODULARITÉ : CAS D'ÉTUDE SIMPLES.....	85
BIBLIOGRAPHIE		89

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 1.1	Définition de la complexité.....	8
Tableau 1.2	Sources de la complexité	11
Tableau 1.3	Solutions à la complexité	12
Tableau 1.4	Catalyseurs de la modularité de produits et leurs caractéristiques	15
Tableau 1.5	Relation entre l'architecture du produit et l'architecture du système manufacturier	19
Tableau 1.6	Variété obtenue par combinaison des modules.....	23
Tableau 1.7	Manuel de l'indice de complexité.....	32
Tableau 1.8	Récapitulatif des métriques de complexité	38
Tableau 2.1	Classification des métriques de la modularité	43
Tableau 2.2	Choix des indices de modularité appliqués.....	44
Tableau 2.3	Résultat du test de l'indice d'indépendance des modules.....	47
Tableau 2.4	Description des variables de l'indice de modularité	50
Tableau 2.5	exemple d'application de la base géométrique	51
Tableau 2.6	Exemple d'application de la pondération en fonction du niveau.....	51
Tableau 2.7	Données Skidoo 1	54
Tableau 2.8	Données Skidoo 2	54
Tableau 2.9	Nomenclature des paramètres de complexité.	57
Tableau 2.10	Récapitulatif des poids selon le niveau de mesure de la complexité	61
Tableau 2.11	Lignes sujettes aux tests des métriques de complexité	63
Tableau 3.1	Données préliminaires au calcul de l'indice de modularité	65
Tableau 3.2	Résultats de l'indice de modularité en % pour les cas d'études simples	66

Tableau 3.3	Classement des cas divergents sans le paramètre γ	67
Tableau 3.4	Indice de modularité en % pour les cas d'études complexes.....	68
Tableau 3.5	Indice de modularité Skidoo 1 et Skidoo 2.....	71
Tableau 4.1	Limites des fonctions complexité	73
Tableau 4.2	Classements selon les modèles de complexité et celui des experts	74
Tableau 4.3	Corrélations modèles de complexité et les classements des experts.....	75
Tableau 4.4	Corrélation modèles de complexité et moyenne BRP	76

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Évolution de BRP au fil du temps.....	2
Figure 1.2	Présence de BRP à travers le monde.....	3
Figure 1.3	Processus de développement de BRP	3
Figure 1.1	Types de complexité	10
Figure 1.2	Sources de complexité	11
Figure 1.3	Architecture intégrale vs architecture modulaire	14
Figure 1.4	Architecture de la production modulaire	17
Figure 1.5	Procédé manufacturier et la matrice de structure de conception	17
Figure 1.6	Répartition du procédé manufacturier en modules opérationnels.....	18
Figure 1.7	Caractéristiques de la modularité du système manufacturier	19
Figure 1.8	Du monocoque intégré au véhicule modulaire	22
Figure 1.9	Exemple de production de la variété.....	23
Figure 1.10	Inconvénients de la modularité	25
Figure 1.11	Les métriques de la modularité du procédé manufacturier	26
Figure 1.12	Approches et méthodes de mesure de la complexité	29
Figure 1.13	Grille d'évaluation de l'indice de complexité.....	33
Figure 1.14	Taches à la station <i>S</i>	36
Figure 1.15	Zoom sur les métriques de la complexité statique	41
Figure 2.1	Exemple d'APS simplifié	45
Figure 2.2	Proposition de onze (11) configurations pour le test des indices.....	46
Figure 2.3	Nouvelle représentation de l'APS du produit intégrant les niveaux	48

Figure 2.4	Interprétation de l'indice de modularité.....	48
Figure 2.5	Identification les éléments constitutifs d'un APS quelconque	49
Figure 2.6	Distinction des différents éléments d'APS simplifié suivant la nouvelle représentation.....	50
Figure 2.7	Cas d'étude complexes	53
Figure 2.8	Processus de validation de l'indice	55
Figure 2.9	Paramètres détaillés de la complexité d'une ligne d'assemblage	56
Figure 2.10	Démarche méthodologique de mesure de la complexité	64
Figure 3.1	Représentation en niveaux des cas d'étude simples	66
Figure 3.2	Nuage de points des cas d'étude simples.....	67
Figure 3.3	Identification des similarités entre les cas 2,3 et 4.....	67
Figure 3.4	Nuage de points des cas d'étude complexes	69
Figure 3.5	Cas intéressants des APSs complexes.....	69
Figure 3.6	Graphé de Skidoo 1.....	70
Figure 3.7	Graphé Skidoo 2	71
Figure 4.1	Droites de régression linéaire des trois modèle et la moyenne des classements de BRP	75

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACFAS	Association Canadienne-Française pour l'Avancement des Sciences
APS	<i>Assembly Process Structure</i>
ASM	Architecture du système manufacturier
BRP	<i>Bombardier Recreational Products</i>
CSME	<i>Canadian Society of Mechanical Engineering</i>
DFA	<i>Design For Assembly</i>
MSC	Matrice de structure de conception

INTRODUCTION

Le souci de mieux maîtriser les processus de conception des nouveaux produits est grandissant, notamment avec la volonté d'offrir aux clients des produits de meilleure qualité, plus personnalisés à leurs exigences, à un coût plus compétitif et avec un délai de mise sur le marché plus court (Fotso, 2006). Dans un système de fabrication, **la complexité** est toujours présente, à partir du moment où les composants primaires entrent jusqu'à la sortie du produit fini. Il est important d'envisager et de réaliser une gestion optimale de la complexité, afin que l'entreprise obtienne des impacts positifs sur ses indicateurs de performance et sur la satisfaction client (Herrera Vidal & Coronado Hernández, 2021a).

La littérature du domaine présente la modélisation de la **modularité d'un produit** (ou d'un bien) comme une solution intéressante à la complexité manufacturière (Shoval & Efetmaneshnik, 2019). C'est ainsi que notre étude intitulée « Modularité de produit et complexité manufacturière » s'inscrit en droite ligne dans les défis de production rencontrés dans l'industrie. Pour mieux nous approprier la thématique, on identifie les mots clés du sujet pour bien orienter et cibler notre recherche bibliographique. Selon (Frigant & Jullien, 2014), la modularité relève d'une règle de conception visant à concevoir l'architecture d'un produit en une série de sous-systèmes hiérarchiquement emboités (modules), reliés les uns aux autres par des interfaces physiques et informationnelles stabilisées et les moins nombreux possibles. Ceci est dans le but évident de réduire la complexité, faciliter la maintenabilité du produit et satisfaire davantage les besoins des clients. La principale raison de l'étude de la complexité d'un produit ou de système de fabrication est que le comportement non linéaire des systèmes de production doit être compris et contrôlé afin de permettre une optimisation de la conception et une planification plus productive et plus prédictive des systèmes de fabrication et d'assemblage (Efthymiou, Mourtzis, Pagoropoulos, Papakostas, & Chryssolouris, 2016).

Un opérateur manipule plus qu'un unique composant dans le système d'assemblage. Par conséquent, les tâches de l'opérateur varient d'un produit à l'autre et la complexité découle des différences de tâches dans le système de fabrication et d'assemblage. Les entreprises ont donc

besoin d'un modèle de complexité capable de montrer où la complexité survient le plus et quel produit a le plus d'impact sur le système d'assemblage (Oh, Kim, & Hong, 2015a).

Par conséquent, la notion de **complexité de fabrication** englobe des situations différentes qu'il est difficile de la définir de manière unique (Kerbrat, 2009). Pour cela, on s'intéresse tout d'abord à la complexité des systèmes de fabrications dans leur globalité, ensuite à l'approche modulaire d'un produit, et enfin, on identifie les métriques existantes pour mesurer la complexité manufacturière.

0.1 Contexte et problématique

Le secteur industriel est de plus en plus compétitif. Ce qui amène les entreprises à produire des gammes de produits variés et mieux adaptés aux besoins spécifiques du client. Bombardier Recreational Product (BRP), qui fait l'objet de notre étude, est une entreprise fondée dans les années 40 à Valcourt au Québec qui abrite son siège social. BRP est spécialisée dans la production des véhicules récréatifs. La Figure 1.1 présente l'histoire de BRP en indiquant les années de créations de ses différents produits phares.

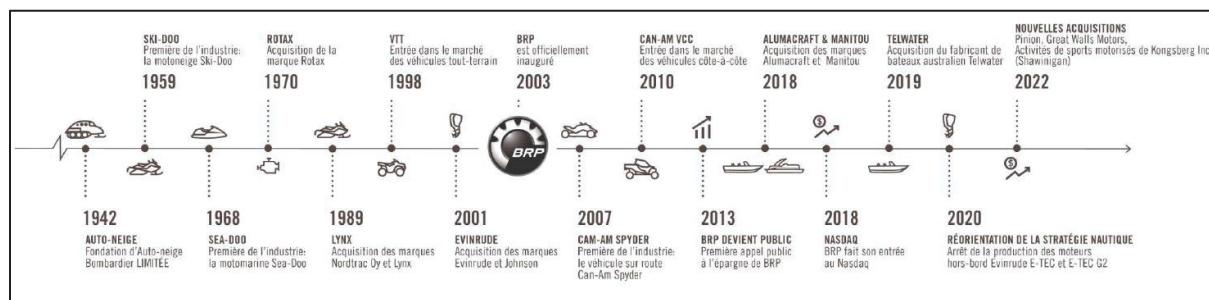


Figure 1.1 Évolution de BRP au fil du temps
Tirée de BRP (2023, p. 3)

BRP possède 12 sites manufacturiers installés dans 6 pays (Canada, États-Unis, Finlande, Mexique, Autriche et l'Australie) dans lesquels sont produites les 8 marques (Ski-doo®, Sea-doo®, Lynx®, Can-Am®, Rotax®, Alumacraft®, Manitou® et Quintrex®). La Figure 1.2 donne un aperçu de l'expansion de BRP à travers le monde.



Figure 1.2 Présence de BRP à travers le monde
Tirée de BRP (2023, p. 2)

Notre projet est circonscrit à l'usine de Valcourt qui produit exclusivement la motoneige, la motomarine et les véhicules à 3 roues.

En effet, tout au long des dernières années, le développement de produits et les nouvelles introductions technologiques en production (fabrication et assemblage) se sont considérablement accélérés chez BRP. L'usine produit une très grande variété de chacun des véhicules sur ses lignes d'assemblage. Cette cadence de croissance génère un niveau élevé de complexité dans l'organisation. Pour gérer cette complexité, BRP s'est lancé dans le processus de modularisation de ses produits. Au niveau de l'équipe ingénierie, une architecture modulaire globale de produit a été développée suivant le processus de développement de l'entreprise représenté à la Figure 1.3.

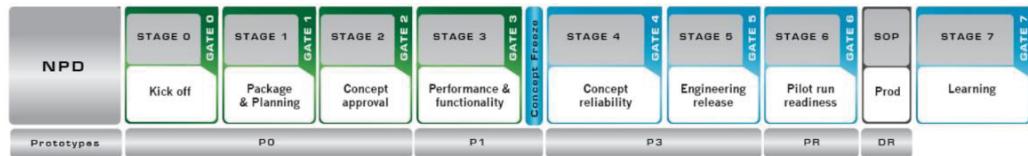


Figure 1.3 Processus de développement de BRP
Tiré de BRP (2023, p. 7)

Parallèlement, le département de stratégie manufacturière est présentement à la recherche de solutions pour mesurer le degré de complexité, développer des indicateurs qui serviront à

stabiliser celle-ci tout en continuant de satisfaire les attentes de leurs clients. L'équipe de la stratégie manufacturière a donc commencé à définir une méthodologie pour modulariser les procédés manufacturiers. Cependant, les rôles, les responsabilités, les façons de faire, les mesures, les outils ne sont pas définis pour bâtir et faire évoluer l'architecture des procédés. Ainsi il est question de développer et déployer les méthodes et outils pour quantifier le degré de modularité et de complexité du procédé manufacturier des produits. Ceci pouvant servir de base mesurable à la prise de décision relative à l'évolution de l'architecture manufacturière en parallèle au développement de l'architecture produit.

0.2 Objectif de l'étude

L'objectif principal de cette recherche est de développer des indicateurs de mesure de la modularité et de la complexité manufacturière des produits afin d'optimiser les lignes d'assemblage tout en satisfaisant les attentes des clients. De manière spécifique, cette étude vise à

- 1- Développer une méthodologie de **mesure de la modularité** dans le cadre de l'assemblage des produits récréatifs ;
- 2- Développer une méthodologie de **mesure de la complexité** dans le cadre des produits récréatifs.

0.3 Questions de recherche

L'atteinte des objectifs de ce projet nous invite à poser les interrogations suivantes ?

- Quelles sont les métriques de modularité et de complexité retrouvées dans la littérature ?
- Ces métriques de modularité et complexité existantes fonctionnent-elles dans notre contexte d'étude ?
- Comment adapter ces mesures à notre problématique ? Et comment les valider avant déploiement industriel ?

0.4 Frontières de l'étude

En général la notion de modularité renvoie à la modularité du produit, pourtant cela va bien au-delà. Ainsi, dans le cadre de ce projet, on va s'intéresser à la modularité et à la complexité du procédé manufacturier des produits. En ce qui concerne la complexité en particulier, on se situera dans son domaine interne, plus précisément on étudiera uniquement la complexité dite statique.

0.5 Organisation du mémoire

Pour mener à bien cette étude, le présent mémoire est organisé selon le canevas suivant :

- 1- Introduction générale qui présente de manière concise le contexte de l'étude, la problématique, les objectifs, l'importance, les limites de l'étude et l'organisation du mémoire ;
- 2- Chapitre 1 : Revue de la littérature qui présente les notions de base de la complexité et de la modularité telles que recensées dans la littérature du domaine, ainsi que les méthodes de mesures existantes ;
- 3- Chapitre 2 : la méthodologie qui présente les moyens et méthodes d'atteinte des objectifs du projet ;
- 4- Chapitre 3 : qui révèlera les résultats obtenus de l'étude de la modularité ;
- 5- Chapitre 4 : qui révèlera les résultats obtenus de l'étude de la complexité ;
- 6- Conclusion générale et recommandations.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 La complexité des systèmes manufacturiers

Les travaux de (Herrera Vidal & Coronado Hernández, 2021a) tentent de répondre à la problématique de l'environnement commercial qui est de plus en plus complexe et concurrentiel. Les auteurs préconisent que les organisations doivent impérativement répondre aux nouvelles et différentes conditions du marché en reconfigurant leurs processus, produits et services. Ils présentent aussi une revue exhaustive de la littérature sur la complexité des systèmes de fabrication en vue de répondre à des questions pertinentes y afférentes, à savoir :

- Qu'est-ce que la *complexité manufacturière* ?
- Quels sont ses domaines d'application scientifiques ?
- Quels sont les facteurs qui interviennent dans la complexité ? Quels sont leurs types et leurs origines ?

Et finalement, quels sont les stratégies, les méthodes et les outils pour maîtriser la complexité manufacturière ?

1.1.1 Définition de la complexité manufacturière

La littérature propose plusieurs définitions de la complexité. Le Tableau 1.1 présente quelques définitions proposées par les chercheurs et en fonction du domaine scientifique. À la lueur des analyses bibliographiques (Kerbrat, 2009) propose une définition précise en ces termes : *La complexité manufacturière d'une pièce est liée aux paramètres de conception (géométriques, dimensionnels, choix de matériaux, définitions des spécifications) qui en influencent le temps, le coût ou la qualité de réalisation pour un procédé de fabrication donné.*

Tableau 1.1 Définition de la complexité

Année	Auteur	Source	Éléments de définition
2023	(Modrak & Soltysova, 2023b)	Article	La complexité en général est la science de l'étude des phénomènes qui émergent d'une collection d'objets en interaction
2022	(Germán Herrera Vidal, Coronado-Hernández, & Niebles, 2022)	Article	La mesure de la complexité des systèmes de fabrication permettra aux gestionnaires d'étudier et de comparer différents types de configurations, de structures et de conceptions, d'évaluer le comportement des systèmes et de faciliter la prise de décisions précises
2021	(Herrera Vidal & Coronado Hernández, 2021a)	Article	La complexité est toujours présente, depuis l'entrée des matières premières jusqu'à la sortie du produit fini ; son niveau dépend de la façon dont le système est structuré et de la variété
2015	(Oh, Kim, & Hong, 2015b)	Article	La complexité provient des tâches que doit effectuer un opérateur notamment le choix des pièces ainsi que les machines et outils présents au poste de travail
2014	(Tamaskar, Neema, & DeLaurentis, 2014)	Article	La complexité du système dépend des composants qui interagiront dans le développement de la production
2013	(Chryssolouris, Efthymiou, Papakostas, Mourtzis, & Pagoropoulos, 2013a)	Article	La mesure de la complexité statique s'accroît avec l'augmentation du nombre de connexions
2012	(W. ElMaraghy, ElMaraghy, Tomiyama, & Monostori, 2012)	Article	Un système sera plus complexe s'il est constitué de plusieurs pièces ou composants possédant plusieurs interconnexions
2012	(Crespo-Varela, Okudan Kremer, Tucker, & Medina, 2012)	Article	La complexité est définie comme la difficulté de comprendre les exigences de fonctionnalité d'un produit et l'interconnexion de ses composants
2011	(Mattsson, Gullander, & Davidsson, 2011)	Article	La complexité perçue dans les systèmes de production est composée du facteur technique (machine et équipement), des tâches à réaliser (variété de volume et des dépendances) et du

Année	Auteur	Source	Éléments de définition
			facteur humain (connaissances, formation, type de personne, antécédents, volonté)
2009	(Kerbrat, 2009)	Thèse	La complexité manufacturière d'une pièce est liée aux paramètres de conception (géométriques, dimensionnels, choix de matériaux, définitions des spécifications) qui en influencent le temps, le coût ou la qualité de réalisation pour un procédé de fabrication donné.

Toutes ces définitions de la complexité sont relatives à des domaines scientifiques particuliers et des types de complexité.

1.1.2 Domaine d'application et types de complexité

D'après les diverses définitions de la complexité, on relève que les domaines scientifiques de la complexité sont les sciences de l'administration, gestions des opérations, la fabrication, les sciences organisationnelles et la gestion des approvisionnements (Herrera Vidal & Coronado Hernández, 2021a).

Plusieurs chercheurs (W. ElMaraghy et al., 2012 ; Mourtzis, Fotia, & Boli, 2017 ; Germán Herrera Vidal, Coronado-Hernández, & Minnaard, 2023) considèrent que les types prévalents de complexité sont la **complexité interne** qui est associée aux flux au sein du système manufacturier et qui peut être causée par des facteurs externes à l'organisation. D'un point de vue temporel et comportemental, on distingue la **complexité statique** qui fait référence à une caractéristique qui peut être associée aux systèmes ou au processus de production, et la **complexité dynamique** qui est liée aux changements de variables pertinentes dans le processus sur un horizon temporel en étudiant les aléas et les incertitudes dans les opérations. Ainsi, la complexité statique étudie la partie structurelle du système et la complexité dynamique étudie l'incertitude dans les opérations.(Germán Herrera Vidal, Hernández, & Minnaard, 2023)

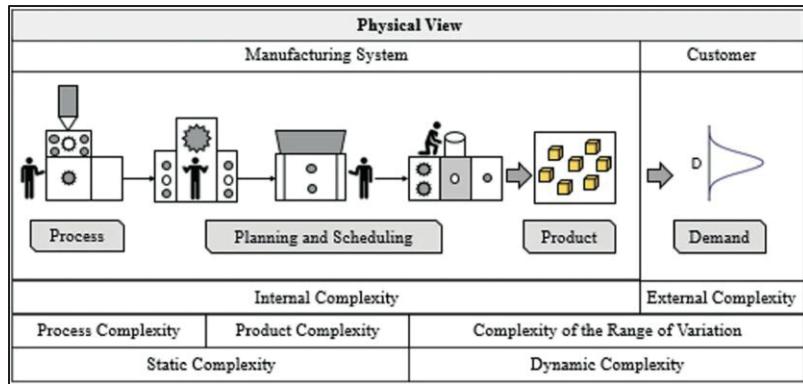


Figure 1.1 Types de complexité

Tirée de G.H. Vidal, Coronado-Hernandez, & Niebles (2022, p. 186)

1.1.3 Sources de la complexité dans les systèmes manufacturiers

On distingue sur la Figure 1.2, quatre (4) principales sources de complexité qui sont d'une part statique et d'autre part dynamique. Deux (2) sont internes à l'organisation et deux autres externes.

Les sources internes émanent du :

- Produit en lui-même qui sont liées aux attentes des clients, la structure du produit (les interactions entre les composantes, les interfaces, la formes des composants...) et la technologie utilisée.
- Processus de production (l'implantation de l'usine, la planification de la production, les approvisionnements, les facteurs humains, les outils et méthodes de production...).

Les sources externes quant à elles émanent de :

- La pression du marché (concurrence, la demande...).
- La pression environnementale et sociale (les lois, les standards...).

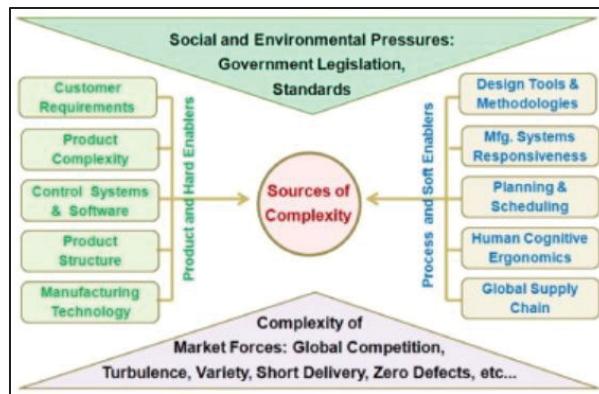


Figure 1.2 Sources de complexité
Tirée de W. ElMaraghy et al. (2012, p. 792)

De manière détaillée, (Efthymiou, Mourtzis, et al., 2016) identifient huit (8) sources regroupées en celles dynamiques d'une part et statiques d'autre part présentées dans le Tableau 1.2.

Tableau 1.2 Sources de la complexité
Adapté de Herrera Vidal & Coronado Hernández (2021a, p. 326)

Complexité statique	Complexité dynamique
Nombre et variété de produits Nombre de pièces Structure du produit Nombre de machines ou postes de travail Distribution de l'usine	Volume de la production Planification et programmation de la production Incertitude dans le processus

La complexité a un effet négatif sur la productivité et sur la qualité, étant donné qu'un grand nombre de produits et/ou la variété de leurs composants génère des difficultés dans la conception et le fonctionnement des chaînes de montage, par conséquent, des opportunités croissantes pour avoir des défauts. Ainsi la complexité statique qui est liée au produit comme tel, possède un impact négatif sur les coûts de production, et d'une manière similaire, plus la complexité dynamique est grande, plus les coûts seront élevés (Herrera Vidal & Coronado Hernández, 2021b).

1.1.4 Stratégie de gestion de la complexité

Les sources de complexité étant définies des points de vue statiques et dynamiques, des stratégies de résolution sont proposées dans le Tableau 1.3. Certains auteurs proposent une réduction du nombre du produit pour répondre à la complexité liée à la variété ce qui ne semble pas idéal, car c'est cette diversité qui permet de satisfaire la grande majorité des clients à travers la personnalisation de masse rendant l'entreprise compétitive sur le marché (Wang, Ma, Yang, & Wang, 2017). Le choix de l'une ou de l'autre de ces solutions est soutenu sur une base analytique et quantitative de la complexité. D'où la nécessité d'une méthode de mesure ou d'appréciation de la complexité afin d'obtenir un indicateur qui aide à la décision.

Tableau 1.3 Solutions à la complexité
Adapté de Herrera Vidal & Coronado Hernández (2021a, p. 326)

Complexité statique	Complexité dynamique
Réduire le nombre de produits	Normalisation des opérations
Réduire les options dans le produit et l'unité de gestion des stocks	Automatisation des processus
Réduire le nombre d'associés de l'externalisation	L'échange d'informations
Réduire le nombre de poste de travail	Externalisation de la logistique
	Planification à court terme
	Gestion de la demande et pronostics
	Amélioration et refonte des processus

À ces stratégies on pourrait ajouter la modularisation des produits visant à réduire la complexité liée à l'architecture du produit (Fotso, 2006 ; Frigant & Jullien, 2014 ; Shoval & Efatmaneshnik, 2019).

1.2 L'approche modulaire

1.2.1 Définition et principes

La modularité vise à réduire le degré de complexité qui affecte tout système technique complexe par deux biais. Un biais quantitatif qui provient du nombre de composants qui contribuent à la fonctionnalité du système global. Un biais qualitatif qui découle de la nature des interactions physiques et informationnelles qu'entretiennent entre eux les composants (Frigant & Jullien, 2014). Son but général est de décomposer le système complexe en parties

constitutives qui pourraient se désagréger « naturellement » sans détruire l'intégrité de l'ensemble (Pandremenos, Paralikas, Salonitis, & Chryssolouris, 2009).

Selon (Shaik, Rao, & Rao, 2015) la modularisation obéie à (3) principes :

- **La standardisation du processus** qui divise le processus en sous-processus standards qui produisent des unités de base standardisées et customisées ;
- **Le réordonnancement du processus** qui consiste à réorganiser les sous-processus de manière que les sous-processus standard interviennent en premier et que les sous-processus de customisation interviennent en dernier ;
- **Le report du processus** qui consiste à reporter les sous-processus de personnalisation jusqu'à ce qu'une commande soit reçue ou passée par le client.

La définition de ce qu'est un module pour (Efatmaneshnik, Shoval, & Qiao, 2018) repose sur 10 principes fondamentaux. Il se base, entre autres, sur le fait que du point de vue de la fabrication un assemblage ou sous-assemblage (*manufacturing assembly*) est considéré comme un module ce qui corrobore à la définition du module d'assemblage selon BRP. Loin des définitions traditionnelles selon lesquelles un module est une agrégation autonome de composants reliés à d'autres modules par des interfaces stables et bien définies (Blackenfelt, 2001 ; Capponi, Mastrogiacomo, & Franceschini, 2023a ; Fotso, 2006 ; Frigant & Jullien, 2014). Ainsi, on considère la sortie de chaque ligne ou unité de travail comme un module d'assemblage ou *manufacturing assembly* jusqu'à ce que l'on obtienne le produit fini au bout du processus.

1.2.2 Architecture modulaire

L'architecture modulaire désigne le schéma décrivant l'implémentation des éléments fonctionnels du produit dans les modules et comment ces modules interagissent entre eux (Joergensen, Schou, & Madsen, 2014). D'où la nécessité pour les entreprises qui se lancent dans le processus de modularisation de développer non seulement une architecture modulaire du produit, mais aussi une architecture modulaire de son système manufacturier.

1.2.2.1 Architecture du produit

L'architecture du produit est la structure des composants, leurs interactions et les principes qui gouvernent leur conception et l'évolution tout au long du cycle de vie (Bonjour, 2008). On distingue deux types d'architecture du produit présentés par la Figure 1.3 :

- **Une architecture intégrale**, dans laquelle toutes les fonctions et tous les composants sont fortement liés.
- **Une architecture modulaire**, dans laquelle l'espace des fonctions peut être décomposé en sous-ensembles de telle manière que chaque sous-ensemble impacte distinctement un ou un ensemble de composants (Bonjour, 2008).

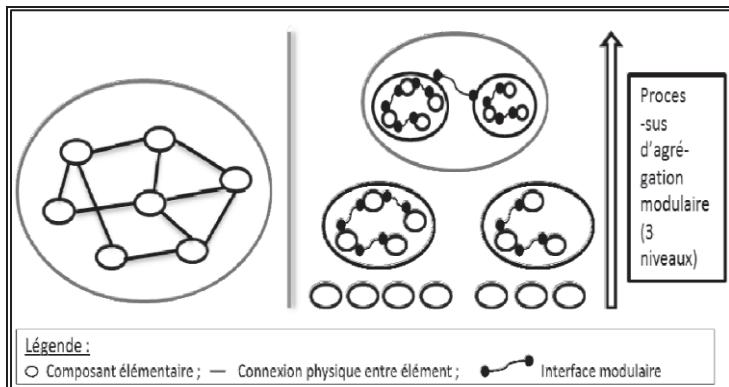


Figure 1.3 Architecture intégrale vs architecture modulaire
 Tirée de Frigant & Jullien (2014, p. 22)

Définir l'architecture modulaire du produit (AMP) c'est choisir des limites de conception de ce produit ainsi que de ses composants afin que les caractéristiques et les tâches de conception soient interdépendantes et indépendantes entre les modules (Kubota, Cauchick-Miguel, Hsuan, & Lacerda, 2022a).

Les critères liés à la conception modulaire d'un produit sont :

- la similitude des composants;
- la capacité combinable des composants;
- la liaison des fonctions;
- la normalisation de l'interface;

- la souplesse du couplage.

De plus, on ajoute la possibilité d'éléments interchangeables qui permettent de configurer une grande variété de produits finaux grâce à un couplage lâche, une facilité de désagrégation, une sortie hétérogène et une correspondance univoque de la fonction à un module (Kubota et al., 2022a).

Le Tableau 1.4 présente les catalyseurs de la mise en modularité d'un produit en prenant en considération les éléments du cycle de vie.

Tableau 1.4 Catalyseurs de la modularité de produits et leurs caractéristiques
Adapté de Gupta (2019, p. 161)

Catalyseurs de la modularité des produits	Caractéristiques
Nombre de modules indépendants	Dépends des exigences fonctionnelles du produit et, par conséquent, une expression généralisée ne peut pas être prise en compte pour évaluer la modularité
Le taux de modules considérés comme technologiquement stables	Un plus grand nombre de ces modules permet de créer de nouveaux produits ou des variantes de produits à l'aide de modules fabriqués sur des lignes de production dédiées
Accessibilité au module	Nombre de modules à retirer pour atteindre le module
Effort physique pour retirer le module	Poids du module Interaction entre les modules en termes d'ajustements et de tolérances, etc. Besoin d'un dispositif externe pour le retrait du module, tel qu'un appareil/une grue, etc.
Disposition d'imbrication entre les modules	Type de joints, c'est-à-dire clavetés, vissés, boulonnés, brasés, soudés
Modularité des connexions électriques	Type de jonction : mâle-femelle Raccord vissé Connexion brasée
Mécanismes de localisation précise des modules	Nombre de guidages à mouvement linéaire Mise à disposition de goupilles dans l'assemblage Utilisation des voies clés Mise à disposition de robinets

Catalyseurs de la modularité des produits	Caractéristiques
Remplacement des modules s'ils sont endommagés en raison de l'utilisation ou de dommages pendant le transport	
Minimiser le nombre d'outils pour le démontage complet du produit dans une structure modulaire	Concevoir les modules de manière qu'ils soient fixés avec des fixations de même taille et, par conséquent, déployer une seule clé pour démonter le produit complet et minimiser l'inventaire des fixations.
Mise à disposition d'autodiagnostic (électrique, mécanique)	Lumières Andon Diagnostic basé sur des capteurs Jauge de contrainte
Modularité des commandes de la machine	

1.2.2.2 Architecture des systèmes manufacturiers

L'architecture des systèmes manufacturiers est définie par des plates-formes de production qui sont un ensemble d'équipements de production, d'interfaces, de processus et de connaissances à partir duquel les systèmes de production et leurs éléments constitutifs peuvent être efficacement dérivés et développés (Sorensen, Brunoe, & Nielsen, 2018).

D'après la Figure 1.4, l'architecture des systèmes manufacturiers relève du domaine physique qui correspond à l'organisation spatiale de la chaîne de production et du domaine opérationnel lié au processus ainsi qu'aux tâches à réaliser à chaque poste de travail.

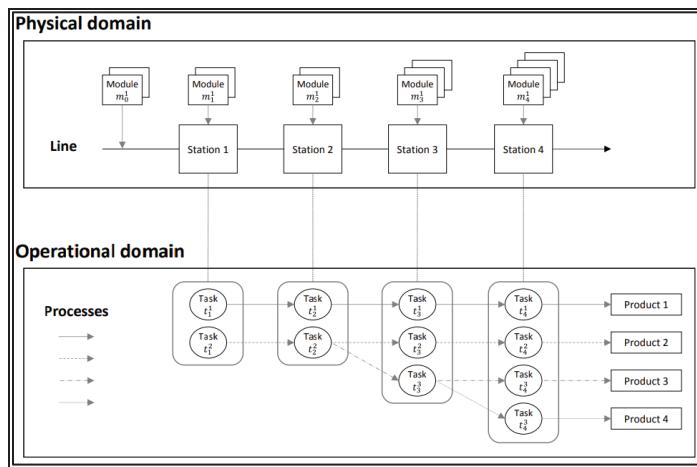


Figure 1.4 Architecture de la production modulaire
Tirée de Oh et al (2015a, p. 3)

La configuration des systèmes de fabrication est représentée par un graphe orienté d'après la Figure 1.5. Les nœuds représentent les points où les décisions concernant la direction et la destination du flux de matériaux sont prises et les flèches qui indiquent la direction des flux de matière (H. ElMaraghy, AlGedawy, Samy, & Espinoza, 2014a). Ainsi on pourra extraire la matrice de structure de conception (MSC) qui présente la nomenclature de la production de façon matricielle.

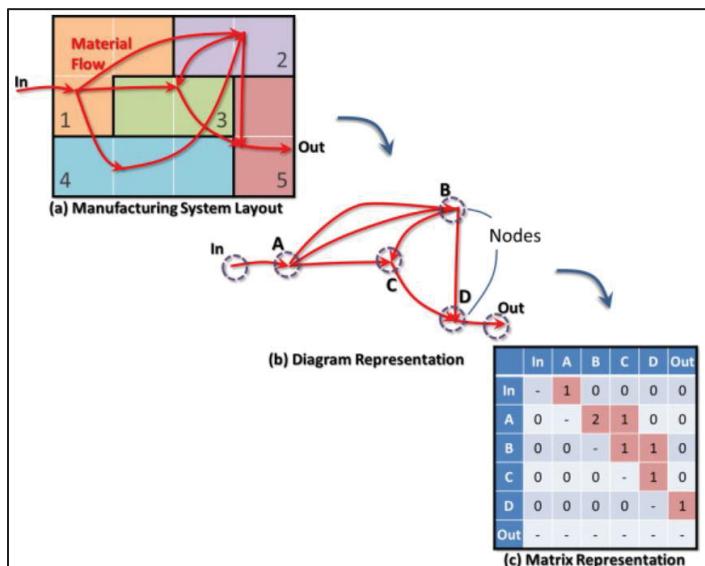


Figure 1.5 Procédé manufacturier et la matrice de structure de conception
 Tiré de H. ElMaraghy et al. (2014a, p. 54)

La MSC est une matrice carrée d'ordre n correspondant au nombre de nœuds et les valeurs représentent le nombre d'interactions suivant la théorie des graphes. La matrice d'adjacence est générée en utilisant les nœuds de la représentation graphique indiqué dans la ligne et la colonne d'en-tête. Les valeurs des cellules de la matrice correspondent aux flèches de la représentation graphique. Si deux nœuds sont connectés, cela signifie qu'il existe un flux de matières entre les postes de travail représentés, la valeur est «1» ; dans le cas contraire, elle est «0».

La modularisation du système manufacturier consiste à concevoir des chaînes de valeur opérationnelles qui maximisent la séparabilité et la capacité combinable. On parlera donc ici de modules opérationnels comme représentés par la Figure 1.6.

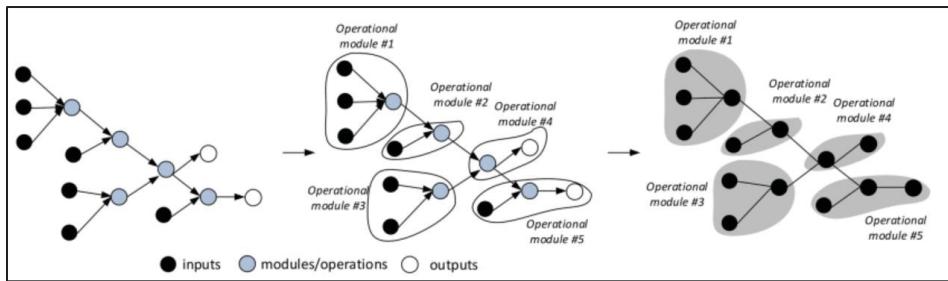


Figure 1.6 Répartition du procédé manufacturier en modules opérationnels
Tiré de Soltysova & Modrak (2021a, p. 2)

Cette modularisation signifie également la conception, la fabrication et l'assemblage de manière à réduire la complexité du processus primaire en utilisant des sous-ensembles, des tests de prémontage des modules, éventuellement en transférant ces activités aux fournisseurs. Ainsi, un procédé peut être considéré comme modulaire lorsque chaque opération de production est indépendante des opérations précédentes (Kubota et al., 2022a). La Figure 1.7 regroupe les caractéristiques de la production modulaire.

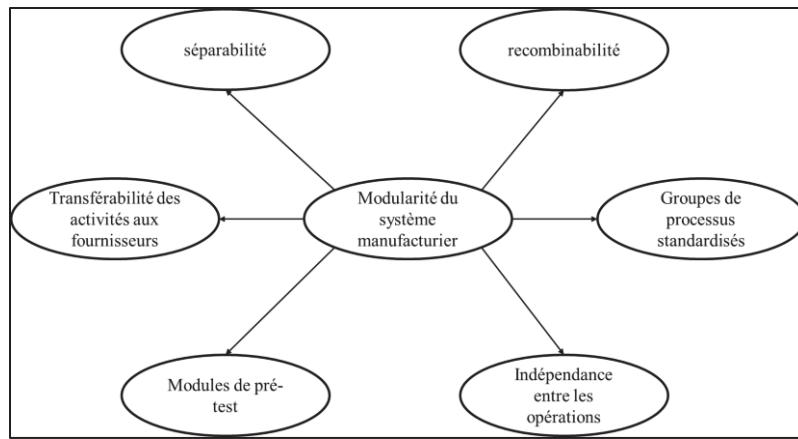


Figure 1.7 Caractéristiques de la modularité du système manufacturier
Adapté de Kubota et al (2022a, p. 1590)

1.2.2.3 Relation entre l'architecture du produit (ADP) et l'architecture du système manufacturier (ASM)

La conception modulaire en général sépare la tâche de conception en unités, qui peuvent ou non suivre les mêmes éléments que les unités de production (Pandremenos et al., 2009). Ainsi (Kubota et al., 2022a) relèvent des faits saillants entre l'ADP et l'ASM existants dans l'industrie automobile et qui sont regroupés dans le Tableau 1.5.

Tableau 1.5 Relation entre l'architecture du produit et l'architecture du système manufacturier
Adapté de Kubota et al (2022a, pp. 1591-1592)

Trajectoire de la relation ADP-ASM	Faits saillants
ADP activant ASM	<p>L'ADP mène à l'ASM</p> <p>Les changements de structure des produits affectent les exigences et les capacités de production</p> <p>La décision stratégique d'adopter l'ADP a des implications subséquentes dans l'ASM</p> <p>Les produits modulaires peuvent faciliter la reconfiguration organisationnelle des entreprises</p> <p>Les décisions relatives l'ADP ont une incidence sur d'autres définitions concernant l'ASM</p> <p>La mobilité de production entre les modèles de différents segments est possible entre les usines appartenant à des réseaux grâce à l'utilisation d'une plate-forme modulaire</p>

Trajectoire de la relation ADP-ASM	Faits saillants
ASM activant ADP	<p>Les entreprises doivent tenir compte des conditions de la structure de fabrication avant de prendre des décisions dans le cadre de la conception de l'ADP</p> <p>Les changements dans la chaîne d'approvisionnement et les interrelations entre les entreprises peuvent nécessiter une redéfinition de l'ADP</p>
Relation bidirectionnelle ADP-ASM	<p>Les avantages de la modularité dépendent des caractéristiques de conception et de fabrication et sont étroitement liés à la capacité du constructeur automobile à utiliser efficacement ses capacités de production</p> <p>La trajectoire de l'interrelation ADP-ASM dépend de l'unité d'analyse étudiée</p> <p>Les caractéristiques de l'ADP, le taux d'apprentissage technologique et organisationnel, au niveau intra et interentreprises, et la structure de l'industrie influent sur l'interrelation ADP-ASM</p> <p>Parfois, la modularité technologique (ADP) pousse l'organisation à l'épreuve ; parfois, la modularité organisationnelle (ASM) induit un changement l'ADP</p> <p>Les entreprises occidentales se concentrent sur l'ASM en réduisant les coûts grâce à l'externalisation ; les entreprises japonaises se concentrent sur l'ADP, le reliant au ASM par le biais de la fonctionnalité, de la normalisation et de la conformité de la qualité.</p>

En résumé, la conception du produit et la conception du système manufacturier agissent l'une sur l'autre en impactant non seulement sur le produit lui-même et l'organisation interne de la production, mais aussi sur les acteurs externes (fournisseurs). Ainsi pour qu'un procédé manufacturier soit modulaire, il faut au préalable que le produit le soit.

1.2.3 Enjeux de la modularité

L'industrie manufacturière a besoin de flexibilité et de capacité de changement pour s'adapter à la dynamique croissante du marché et au besoin connexe de changement, de variété et de personnalisation des produits. L'obtention d'une telle réactivité de fabrication est l'objectif des systèmes de fabrication modulaire (Joergensen et al., 2014). Aussi, la modularité permet de définir des stratégies de fin de vie respectueuses de l'environnement, une réduction des coûts

de développement et un travail efficace au sein des organisations (Bonvoisin, Halstenberg, Buchert, & Stark, 2016 ; Carpenter, 2024).

1.2.3.1 La flexibilité

La flexibilité d'un système de fabrication est déterminée par sa sensibilité au changement. Plus sa sensibilité est faible, plus sa flexibilité est élevée (Chryssolouris, Efthymiou, Papakostas, Mourtzis, & Pagoropoulos, 2013b). La nécessité de flexibilité dans les productions modernes d'un point de vue économique contribue aux gains potentiels de productivité des entreprises qui tiennent compte de la diminution de la taille des lots liée à la personnalisation des produits et adoptent des stratégies de production flexibles.(Kerbrat, 2009). On distingue trois (3) types :

- **La flexibilité du produit** permet à un système de fabriquer une variété de types de pièces avec les mêmes équipements. À court terme, cela signifie que le système a la capacité d'utiliser économiquement de petits lots pour s'adapter à l'évolution de la demande pour divers produits. À long terme, cela signifie que l'équipement du système peut être utilisé sur plusieurs cycles de vie du produit ;
- **La flexibilité de la capacité** permet à un système de fabrication de faire varier les volumes de production de différents produits afin de s'adapter aux changements de la demande en volume tout en restant rentable. Ce type de flexibilité reflète la capacité du système de fabrication à se contracter ou à s'étendre facilement ;
- **La flexibilité de fonctionnement** fait référence à la capacité du système à produire un ensemble de produits en utilisant différentes machines, matériaux, opérations et séquences d'opérations. Elle résulte de la flexibilité des processus et des machines individuels ainsi que de la flexibilité de la structure du système de fabrication lui-même (Chryssolouris et al., 2013b).

D'après la Figure 1.8 les véhicules sont passés d'une carrosserie unitaire intégrée ou monocoque ayant un volume de production élevé et d'une faible flexibilité, à des véhicules modulaires d'un volume de production et d'une flexibilité moyens à élevés (Pandremenos et al., 2009).

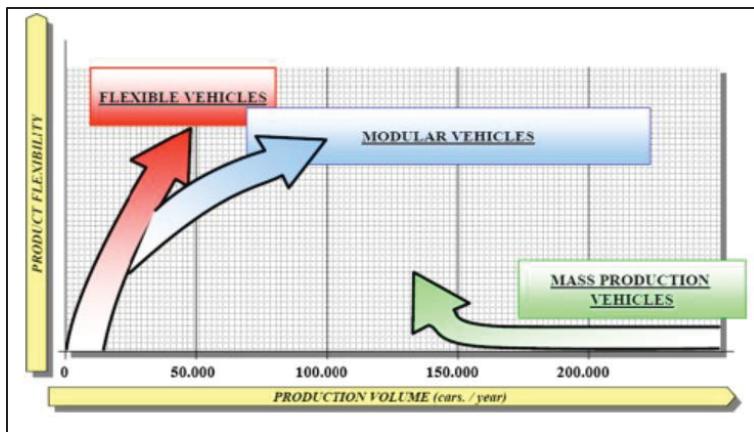


Figure 1.8 Du monocoque intégré au véhicule modulaire
Tiré de Kubota et al (2022b, p. 1592)

Cette vision s'applique également dans le cadre des produits récréatifs, car plus on a des modules, plus on gagne en flexibilité, en volume de production et en variété. Certes les systèmes manufacturiers ont besoin de flexibilité cependant celle-ci augmente en diminuant la performance du produit.

1.2.3.2 Les familles de produits et la variété

La conception par famille de produits a été reconnue comme un moyen efficace pour réaliser une économie d'échelle, pour accommoder une diversité croissante de produits à travers des marchés.

Une famille de produits se définit comme un ensemble de produits semblables possédant des fonctions et des caractéristiques communes, qui satisfont les exigences particulières des clients (point de vue commercial). Chaque produit individuel dans une famille de produits, c'est-à-dire, un membre de la famille, est appelé variante du produit. Dans certains cas, les variantes du produit partagent des structures et/ou technologies communes qui forment la plate-forme de la famille de produits (point de vue technique). Notons qu'un ensemble de modules peut permettre de créer une famille de produits sans pour autant être basé sur une plateforme (Bonjour, 2008). La décomposition modulaire d'un produit permet d'obtenir de la variété par la combinaison des modules telle que présentée à la Figure 1.9.

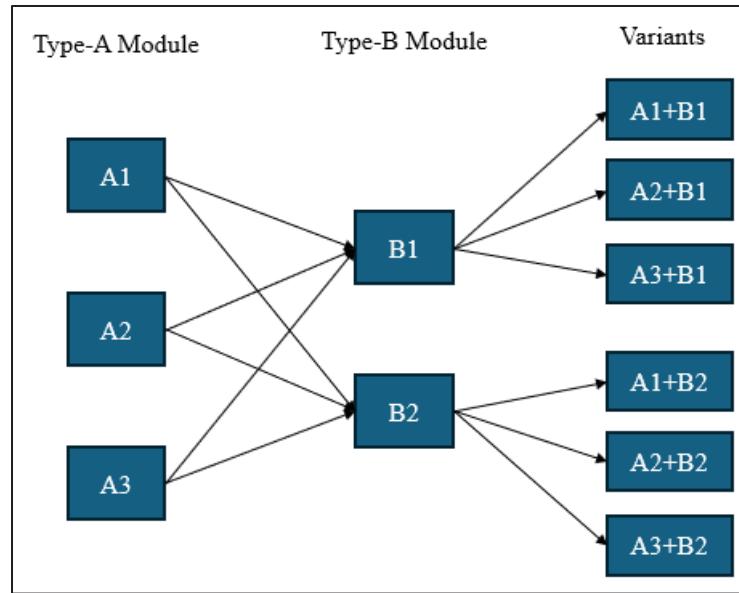


Figure 1.9 Exemple de production de la variété
Tirée de Shaik et al. (2015, p. 790)

Ainsi on obtient 6 produits différents par cette combinaison au Tableau 1.6.

Tableau 1.6 Variété obtenue par combinaison des modules

Produits	Type-A module	Type-B module
P1	A1	B1
P2	A2	B1
P3	A3	B1
P4	A1	B2
P5	A2	B2
P6	A3	B2

1.2.3.3 Personnalisation et customisation de masse

Dans la personnalisation de masse, le produit doit tout d'abord être modulaire (H. ElMaraghy et al., 2013). La personnalisation de masse est la capacité d'une entreprise à obtenir plus de variété, un volume élevé et en même temps un faible coût et une livraison rapide. La modularité est l'un des principaux moyens d'atteindre les exigences de personnalisation de masse susmentionnées (Pandremenos et al., 2009). La customisation de masse, elle peut être définie comme la construction de produits selon les spécifications du client à l'aide de composants modulaires pour réaliser des économies d'échelle. Un produit personnalisé est conçu

spécifiquement pour répondre aux besoins d'un client particulier. (Duray, Ward, Milligan, & Berry, 2000).

1.2.3.4 La standardisation

La littérature montre que la modularité est liée à la standardisation par le biais de la mise en commun des pièces et de l'architecture du produit (Kubota et al., 2022a). C'est un processus visant à rationaliser la composition d'un ensemble de composants de caractéristiques différentes, appelés à satisfaire un ensemble de besoins de nature similaire. Cet effort de rationalisation a généralement pour conséquence de limiter le nombre de composants et de réduire les coûts supportés pour répondre aux besoins à satisfaire. La standardisation est donc un processus majeur de l'amélioration de la compétitivité des entreprises, et plus particulièrement celles de la production de masse (Chatras & Giard, 2015).

La littérature distingue 3 cas de standardisation en fonction du périmètre retenu :

- **Standardisation au sein d'un produit** : plusieurs composants d'un même produit sont remplacés par un composant réutilisé n fois (moteurs électriques, par exemple) ;
- **Standardisation au sein d'une gamme** : plusieurs composants utilisés chacun dans des produits différents sont remplacés par un composant commun aux n produits (système de climatisation, par exemple);
- **Standardisation dans le temps** : le produit de la prochaine génération possédera des composants des produits de la génération présente (Chatras & Giard, 2015).

La standardisation d'un produit ne se limite pas seulement aux composants, elle s'intéresse également aux interfaces entre les modules ainsi qu'aux éléments de fixation qui sont des préoccupations actuelles pour les équipes de BRP.

1.2.4 Les inconvénients de la modularité

Les retombées de l'intégration de la modularité dans la conception et la production manufacturière ne sont pas que positives. La Figure 1.10 présente ses principaux inconvénients.

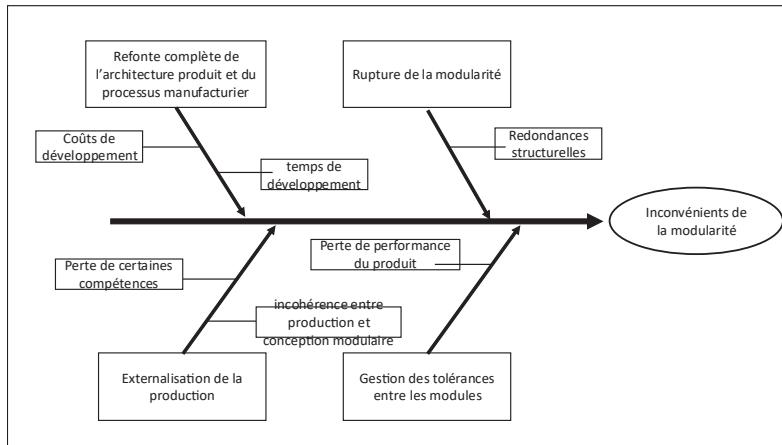


Figure 1.10 Inconvénients de la modularité
Adapté de Pandremenos et al. (2009, p. 150)

D'après la Figure 1.10 la mise en modularité des produits peut entraîner une externalisation de la production des modules tel qu'on a assisté au sein des industries automobiles et aussi dans le cas de BRP. Ce qui pourrait entraîner des pertes de certaines compétences et l'incohérence entre la production et la conception modulaire, car les grandes industries prennent le risque de confier une partie de leur processus de production à des sous-traitants. Si la gestion des tolérances entre les modules n'est pas gérée adéquatement, le produit perd en performance.

Le développement d'un nouveau produit ou l'amélioration d'un produit modulaire entraîne une refonte complète de l'architecture du produit et du procédé manufacturier ce qui requiert du temps et des moyens financiers.

1.3 Les métriques de la modularité du procédé manufacturier

On retrouve dans la littérature deux familles de métriques pour mesurer de la modularité et les méthodes de calculs afférentes présentées par la Figure 1.11.

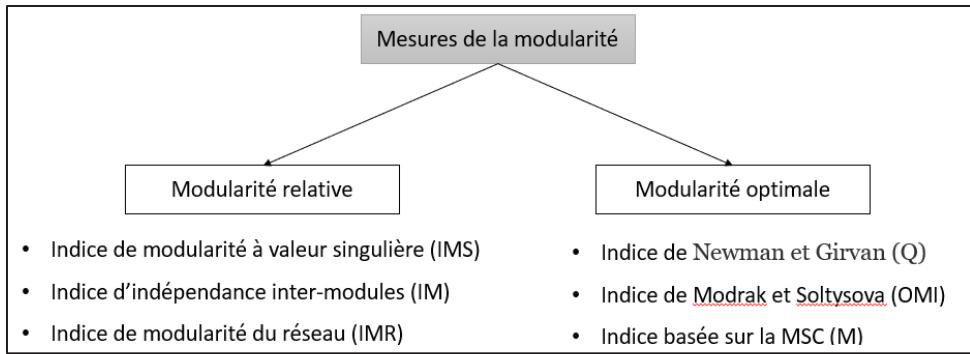


Figure 1.11 Les métriques de la modularité du procédé manufacturier
Adapté de Modrak & Soltysova (2023b, pp. 3-5)

1.3.1 Indice de modularité à valeurs singulières

Bien que cette mesure soit initialement destinée à énumérer le degré de modularité du produit, elle est également applicable pour mesurer la modularité des processus. Cet indice énumère le degré de modularité du système en utilisant une décomposition en valeurs singulières sur la matrice de structure de conception (Modrak & Soltysova, 2023b). L'*IMS* s'obtient suivant l'équation (1.1).

$$IMS = 1 - \frac{1}{N \cdot \sigma_1} \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_i (\sigma_i - \sigma_{i+1}) \quad (1.1)$$

Où N représente le nombre de composants du système; σ_i représente les valeurs singulières obtenues par la diagonalisation Matrice de Structure de Conception (MSC); $i \in [1, N - 1]$ un nombre entier (Modrak & Soltysova, 2023b).

La mesure *IMS* peut atteindre des valeurs comprises entre $[0, 1]$. Les valeurs proches de 1 signifient un degré maximum de modularité tandis que celles proches de zéro signifient un degré minimum de modularité (Soltysova & Modrak, 2021b).

1.3.2 Indice d'indépendance intermodules

L'*IM* s'obtient en effectuant la somme des rapports des relations à l'intérieur de tous les modules par rapport au nombre total. Il est exprimé par l'équation (1.2) :

$$IM = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{T} \quad (1.2)$$

Où R_i est le nombre de connexions interne au module opérationnel i ; T le nombre total de relations du système, n le nombre de modules opérations (Blackenfelt, 2001). Si $IM = 0$, alors cela signifie que la modularité complète est atteinte, et si $IM = 1$, alors la structure est intégrale (Soltysova & Modrak, 2021b).

1.3.3 Indice de modularité du réseau

La construction de cet indicateur est basée sur l'idée selon laquelle le degré de modularité structurelle du système est égal à la modularité de son module ayant le score de modularité le plus élevé. Le score de modularité de chaque module de la structure du système est calculé à l'aide de la formule de l'équation (1.3).

$$NMI = \frac{w_s}{w} - \frac{w_s^{in} + w_s^{out}}{w} \quad (1.3)$$

Où w_s est le nombre d'arêtes à l'intérieur du module opérationnel, w le nombre total de connections dans le réseau, w_s^{in} le nombre d'arêtes des intrants du module s et w_s^{out} le nombre d'arêtes pour les extrants.

1.3.4 Indice de Newman et Girvan

La modularité d'un réseau est le degré auquel il peut être séparé en sous-réseaux presque indépendants. Newman et Girvan ont mis au point une mesure quantitative de la modularité optimale Q . Ils ont mis au point une formule permettant de trouver la division des nœuds en modules exprimée suivant l'équation (1.4) suivante :

$$Q = \sum_{s=1}^n \frac{l_s}{L} - \left(\frac{ds}{2L} \right)^2 \quad (1.4)$$

Où n est le nombre de modules, l_s le nombre d'arêtes entre les nœuds dans le module s , L le nombre d'arêtes dans le réseau et ds la somme des degrés des nœuds dans le module (Soltysova & Modrak, 2021b).

1.3.5 Indice de Modrak et Soltysova

L'indice de Modrak et Soltysova (OMI) pourrait être complémentaire à l'indice de modularité de Newman et Girvan et s'obtient à partir des paramètres similaires, à savoir le nombre de modules M , le nombre de connexions internes du module s et l_s le nombre total des connexions. À cet effet, l'équation (1.5) est proposée :

$$OMI = \frac{\sum_{s=1}^M \left(\frac{l}{L}\right)_s}{M \max \left(\frac{l}{L}\right)_s} \quad (1.5)$$

la valeur de modularité la plus élevée obtenue implique un niveau de modularité optimal de la structure générique donnée (Soltysova & Modrak, 2021b).

1.3.6 Indice optimal de la structure de conception

Cet indicateur vise à mesurer l'indice optimal des structures de processus. Il découle de la théorie de l'information en se basant sur la matrice de structure de conception exprimée par l'équation (1.6).

$$M = \frac{n}{\sum_{j=1}^k (N_j \times \ln N_j)} \quad (1.6)$$

Où n est le nombre de modules dans un réseau, N_j est le nombre de couplages extraits de la colonne j de la matrice de structure de conception et k le nombre de colonnes de cette matrice de conception (Modrak & Soltysova, 2023b).

Tous les indicateurs de modularité mentionnés sont plus ou moins adaptés à l'exploration des relations intermodules. Cependant, il est possible d'identifier des différences pertinentes dans leur sensibilité afin de reconnaître de légères nuances topologiques lors de la comparaison de structures de processus similaires (Modrak & Soltysova, 2023b).

1.4 Les métriques de complexité

La complexité est une mesure quantitative qui peut être utilisée comme paramètre de restructuration ou de décision dans un système de production. Elle est également utile pour l'analyse des améliorations basées sur l'impact des indicateurs opérationnels (Germán Herrera Vidal, Coronado-Hernández, et al., 2023). La littérature distingue différentes approches et méthodes pour mesurer la complexité.

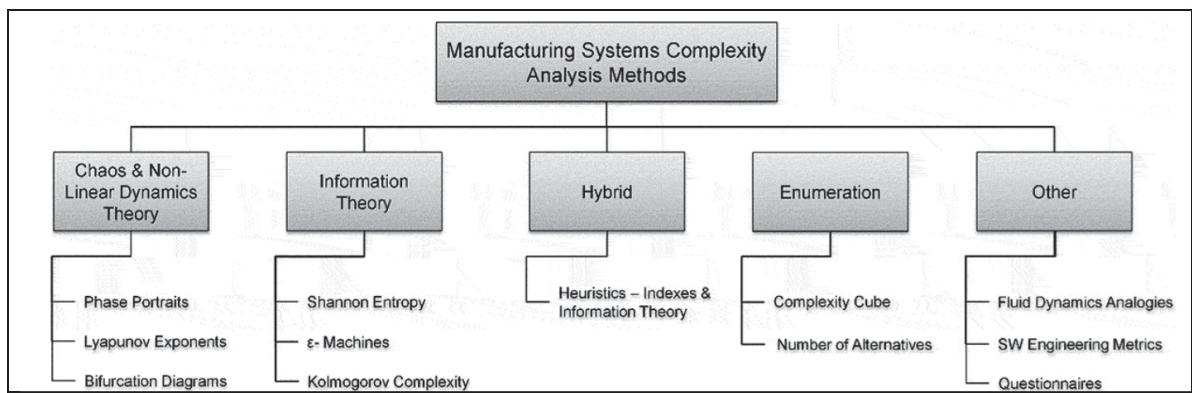


Figure 1.12 Approches et méthodes de mesure de la complexité
Tiré de Efthymiou et al. (2016, p. 1028)

1.4.1 Mesure par la dynamique non linéaire

Les systèmes industriels sont des systèmes dynamiques influencés par plusieurs paramètres qui les font évoluer de façon aléatoire. Certaines méthodes telles que le diagramme de bifurcations, l'espace de phase permettent d'observer l'évolution du système dans le temps. Ils sont préférés pour l'analyse de la complexité dynamique d'un système, mais ils peuvent également être appliqués à l'étude de la complexité statique en modifiant les paramètres structurels du système (Germán Herrera Vidal, Coronado-Hernández, et al., 2023). Cependant, selon (Chryssolouris et al., 2013b ; Efthymiou, Mourtzis, et al., 2016) l'exposant de Lyapunov de ces modèles fournit une évaluation quantitative de la complexité telle que présentée par l'équation (1.7) :

$$|\delta x(t)| \approx e^{\lambda t} |\delta x(0)| \quad (1.7)$$

Où λ désigne l'exposant de Lyapunov, $t \in \mathbb{R}_+$ le temps, $x(t)$ la trajectoire en fonction du temps t et $x(0)$ la condition initiale.

1.4.2 Mesure par la théorie de l'information

La théorie de l'information introduit une métrique pour quantifier l'information, prise comme mesure de l'entropie. Elle est utilisée pour mesurer l'incertitude des variables aléatoires d'un système ou encore pour mesurer la complexité d'un programme informatique ou la complexité d'un signal, fournissant une base quantitative pour la prise de décision (Germán Herrera Vidal, Hernández, & Minnaard, 2022). Cette métrique peut s'appliquer au domaine industriel pour quantifier les complexités statiques et dynamiques. Les méthodes réunies autour de la théorie de l'information découlent du concept de l'entropie de Boltzmann-Gibbs du domaine de la physique quantique (Modrak & Soltysova, 2023b).

1.4.2.1 L'entropie de Shannon

Les informations utiles pour l'application de la méthode de l'entropie de Shannon présentée par les équations (1.8) et (1.9) proviennent du processus, de la planification, qui contient des informations collectées à partir des temps de configuration de chaque opération dans chaque poste de travail, des temps de production et des temps hors production. Par conséquent, le résultat serait donné en bits d'unité de mesure, qui représente la quantité d'information traitée par une ressource donnée et sert de base de comparaison à mesure que les composantes augmentent (G.H. Vidal, Coronado-Hernandez, & Niebles, 2022).

$$C_s = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{ij} \log_2(P_{ij}) \quad (1.8)$$

$$C_d = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P'_{ij} \log_2(P'_{ij}) \quad (1.9)$$

Où C_s est la complexité statique, C_d la complexité dynamique, P_{ij} la probabilité d'état d'une ressource donnée, M la quantité de ressources et N le nombre d'états possibles.

Cependant, cette approche présente des limites en ce qui concerne l'obtention des informations opérationnelles pour les fabricants. Ce qui rend très difficile la mesure des valeurs de probabilité, et par conséquent, l'applicabilité de l'approche dans notre contexte spécifique (Oh et al., 2015a).

1.4.2.2 La complexité d'assemblage

La complexité d'assemblage d'un produit, initialement développée par (H. ElMaraghy, AlGedawy, Samy, & Espinoza, 2014b), équation (1.10), a été plus tard adaptée par (Capponi et al., 2023a) qui propose un nouveau modèle d'évaluation de la complexité de l'assemblage d'un produit à l'équation (1.11) après avoir démontré que la complexité du produit $CI_{produit}$ découle des jugements subjectifs des experts. Ainsi, cela ne garantit pas que les résultats seront les mêmes si l'évaluateur change d'avis.

$$C_{produit} = \left(\frac{n_p}{N_p} + CI_{produit} \right) \log_2(N_p + 1) + \frac{n_s}{N_s} \log_2(N_s + 1) \quad (1.10)$$

$$C_{produit} = \frac{n_p}{N_p} \log_2(N_p + 1) + \frac{n_s}{N_s} \log_2(N_s + 1) \quad (1.11)$$

Où $C_{produit}$ est la complexité d'assemblage du produit, n_p le nombre de pièces distinctes du produit, N_p le nombre total de pièces du produit, $CI_{produit}$ l'indice de complexité géométrique du produit obtenu de l'analyse de la conception pour l'assemblage (*Design For Assembly*), n_s le nombre de pièces d'attache (*fasteners*) distinctes du produit et N_s le nombre total de pièces d'attache du produit.

1.4.2.3 La complexité de la conception structurelle

L'idée principale de cette approche, proposée par (Modrak & Soltysova, 2023), est d'appliquer la mesure de complexité de conception structurelle par rapport à la variété du produit selon l'équation(1.12) :

$$S_{DC} = \sum_{j=1}^k N_j \ln N_j \quad (1.12)$$

Où S_{DC} est la complexité structurelle en unité naturelle (*nat*), N_j est le nombre de couplages par paramètre de conception et k est le nombre de colonnes de la matrice de structure de conception (*MSC*).

1.4.3 Mesure par l'indice de complexité

On retrouve dans la littérature plusieurs méthodes de détermination de l'indice de complexité. D'une part on distingue des méthodes subjectives (G.H. Vidal et al., 2022) basées sur la perception de la complexité par le travailleur, les informations sont collectées par poste de travail, à partir d'un questionnaire structuré (Zeltzer, Limère, Van Landeghem, Aghezzaf, & Stahre, 2013). Elles s'accompagnent généralement d'une méthode objective.

L'indice de complexité développé par (Mattsson et al., 2011) s'est construit selon le principe de l'indice de robustesse simplifié. Il prend en compte une station ou une ligne et tous les composants et produits qui y sont fabriqués (voir la Figure 1.4). Le questionnaire est structuré selon les critères définis par le Tableau 1.7.

Tableau 1.7 Manuel de l'indice de complexité
Adapté de Mattsson et al. (2011, p. 7)

Paramètres	Question principale	Aspects à considérer
Produit et variantes	Qu'est-ce qui est produit ?	Nombre de produits, de modèles, de variantes, différence entre les variantes, fréquence des mêmes pièces, fréquence des changements, etc.
Méthode	Comment c'est produit ?	Support d'information, nombre d'instructions de travail, type d'instructions, système d'information pour la machine et l'homme, nombre de composants à prélever, similitudes/différences entre les composants, prélever pour manipuler, type d'assemblage, nombre de méthodes.
Aménagement et équipement	Avec quels moyens ?	Disposition, équipement, outils, fixations, nombre de programmes

Paramètres	Question principale	Aspects à considérer
Organisation et environnement	Dans quel contexte ?	Organisation, planification homme-heure, communication, leadership, règles, pression temporelle, compétence, ergonomie, différentes tâches de travail, travail d'amélioration

De cette façon, plusieurs personnes affectées à la même station ou à la même ligne pourraient exposer leur point de vue sur la complexité. L'indice donné par tous est résumé et un indice final sera donné à la station ou la ligne de production afin que la complexité puisse être gérée en conséquence.

Complexity Index Manufacturing system Complexity Degree on station level		Voice of the Process												Manufacturing Concerns based on Data/Reports Other voices of the Process						
		Voice of Production				Voice of Logistics				Manufacturing Concerns based on Data/Reports Other voices of the Process										
Customer Criteria's parameter	Manufacturing process section	Products and variants	Method	Layout and equipment	Organization and Environment	Surveillance/Assn	Products and variants	Method	Layout and equipment	Organization and Environment	Surveillance/Assn	FIT Capability	Robust Index	Design project value	TPM	FEED	DRP/FRRA	Severity (G-FCPA)	Warranty	Audit
		Station/line	Complexity Index: 0. No Complexity 1. Minor – 3. Medium – 9. Extensive Complexity																	
500 Palletline		3.5	3	2	3	2.9	7.5	2.5	4	3	4.3									
Station x1		1	3	1	1	1.5	9	3	1	1	3.5	C	M				C		A	
Station x2		9	3	3	1	4.0	9	1	9	1	5.0	C	S	M			C			
Station x3		1	3	1	9	3.5	9	3	3	9	6.0	C	S	N			C			
Station x4		3	3	3	1	2.5	3	3	3	1	2.5	C	S	N			C	S	S	

Figure 1.13 Grille d'évaluation de l'indice de complexité
Tiré de Mattsson et al. (2011, p. 6)

D'autre part, on retrouve la méthode objective proposée par (H. ElMaraghy et al., 2014a) qui est basée sur la structure de la ligne de fabrication d'un produit. L'indice de complexité de structure *ISC* s'obtient à partir de l'équation (1.13).

$$ISC = \left(\sum_{i=1}^6 C_i \right)^2 - \sum_{i=1}^n C_i^2 \quad (1.13)$$

Où C_i représente les six indices de complexité du graphe orienté de la production à savoir l'indice de densité, l'indice de chemin, l'indice de cycle, l'indice des points de décision, l'indice de répartition des redondances et l'indice d'amplitude de la redondance.

1.4.4 Mesure par une représentation vectorielle dans l'espace euclidien

En tenant compte des aspects de personnalisation de masse, la complexité des systèmes de fabrication devient encore plus grande. Cette métrique de la complexité concerne les systèmes produit-service (PSS). En effet, un PSS qui se compose de la partie tangible qui est le produit et de la partie immatérielle qui est le service est représenté dans l'espace 2D comme un vecteur \vec{V} . L'axe horizontal du vecteur représente la complexité du produit et son axe vertical représente la complexité du service (Mourtzis et al., 2017). Ici on distingue les complexités produit-service dues à la quantité des composants du produit \vec{A} , et les variantes des composants produit-service liées à la personnalisation \vec{B} . Elles sont définies par les équations (1.14) et (1.15).

$$\vec{A} = P_c \vec{i} + S_c \vec{j} \quad (1.14)$$

$$\vec{B} = V_{P_c} \vec{i} + V_{S_c} \vec{j} \quad (1.15)$$

Où P_c et S_c représentent respectivement le nombre de composants du produit et du service; V_{P_c} et V_{S_c} représentent respectivement le nombre de variantes des composants du produit et du service (Mourtzis, Fotia, Boli, & Pittaro, 2018). La complexité totale \vec{Q} est définie par les équations (1.16) et (1.17).

$$\vec{Q} = \vec{A} + \vec{B} \quad (1.16)$$

$$\vec{Q} = \|\vec{Q}\| \cos \alpha \vec{i} + \|\vec{Q}\| \sin \alpha \vec{j} \quad (1.17)$$

L'orientation de la customisation est dépendante de l'angle α et définie par l'équation (1.18) (Mourtzis et al., 2017).

$$\alpha = \begin{cases} < 45^\circ \text{ la customisation est orientée produit} \\ > 45^\circ \text{ la customisation est orientée service} \end{cases} \quad (1.18)$$

1.4.5 Mesure par l'architecture du produit

1.4.5.1 La métrique de Bashir et Thompson

La complexité du produit est un terme générique couvrant les mesures de la variété, de la diversité et de l'interdépendance d'un seul produit ou d'une gamme de produits dans un système de production. Elle englobe également des termes connexes, tels que la personnalisation du produit, la diversification des produits (Trattner, Hvam, Forza, & Herbert-Hansen, 2019). Le calcul de la complexité du produit est lié à une représentation par niveaux de l'analyse fonctionnelle du produit. Sont distinguées les fonctions primaires (fonctions principales) et secondaires (esthétisme, fiabilité, etc.)(Bashir & Thomson, 1999).

$$PC = \sum_{J=1}^l J F_j \quad (1.19)$$

Où F_j est le nombre de fonctions au niveau J que le produit doit respecter et l le nombre de niveaux de l'analyse fonctionnelle.

1.4.5.2 La métrique de Keating

La métrique de complexité de Keating (C), équation (1.20), quantifie la complexité due au nombre de modules (M) et les interactions entre les modules (I) (Crespo-Varela et al., 2012 ; Keating, 2000).

$$C = M^2 + I^2 \quad (1.20)$$

1.4.5.3 Mesure par la modélisation de l'architecture de produit

La métrique de la complexité des systèmes d'assemblage sur la base de la modélisation de l'architecture de production est une méthode développée par (Oh et al., 2015a). Elle est liée aux tâches induites par la variété. La complexité induite par la différence de tâche peut être mesurée depuis chaque station jusqu'à un système d'assemblage complet et il est possible de réduire la complexité globale en contrôlant les tâches qui sont attribuées aux stations. Le

mechanisme de génération de tâches à une station est décrit par la Figure 1.14 et les notations des éléments inclus sont définies comme suit :

- Les variantes du module $\{m_s^p\}$, $m_s^1 \leq m_s^p \leq m_s^{u_s}$
- Les variantes d'entrée $\{l_s^q\}$, $l_s^1 \leq l_s^q \leq l_s^{v_s}$
- Les tâches $\{t_s^i\}$, $t_s^1 \leq t_s^i \leq t_s^{n_s}$

Où s désigne la station, m_s^p est la p -ème variante de module de la station, u_s le nombre de variantes de module de la station. De même, l_s^q est la q -ème variante d'entrées de la station, v_s le nombre de variantes d'entrées de la station. Enfin, t_s^i est la i -ème tâche de la station et n_s le nombre de tâches. La tâche étant fonction du module et de l'entrée, si l'un de ces éléments est modifié alors on considère l'opérateur effectue une tâche différente (Oh et al., 2015a).

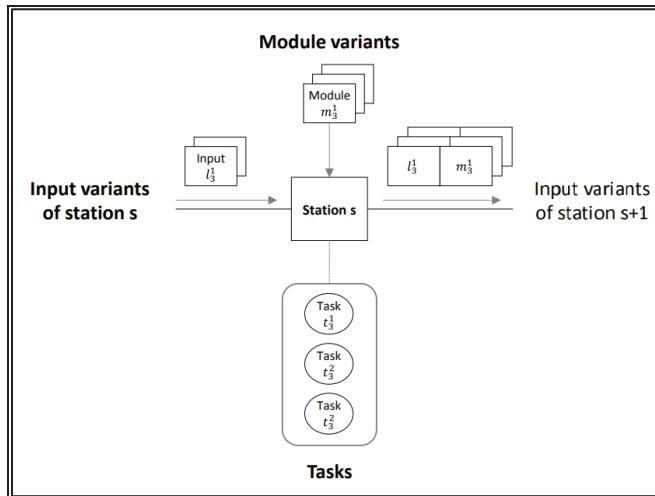


Figure 1.14 Tâches à la station S
Tiré de Oh et al. (2015a, p. 3)

La complexité du système d'assemblage C est donc la somme des complexités de chaque station C_s (équation(1.21)).

$$C = \sum_{s=1}^S C_s \quad (1.21)$$

La complexité à une station est déterminée par l'équation (1.22).

$$C_s = \sum_{i=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{n_s} (D_s)_{ij} \quad (1.22)$$

Où $(D_s)_{ij}$ est la valeur des différences entre la $i^{\text{ème}}$ et la $j^{\text{ème}}$ tâche de la station.

Tableau 1.8 Récapitulatif des métriques de complexité

Catégorie	Métrique	Type de complexité	Nature	Valeur d'entrée	Équation	Limites	Références
		Objectif	Subjective				
Théorie de l'information	Diagramme de bifurcation	X	X	/	/	Ne quantifie pas la complexité	(Chryssolouris et al., 2013b ; Efthymiou, Mourtzis, et al., 2016)
	L'exposant de Lyapunov	X	X	$x(t)$ la trajectoire par rapport au temps; $x(0)$ la condition initiale.	$ \delta x(t) \approx e^{\lambda t} \delta x(0) $	Décrit la non-linéarité de la complexité	(Chryssolouris et al., 2013b ; Efthymiou, Mourtzis, et al., 2016 ; Herrera Vidal & Coronado Hernández, 2021a ; Modrak & Soltysova, 2023a ; Oh et al., 2015a ; Germán Herrera Vidal, Coronado-Hernández, et al., 2023)
Dynamique non linéaire	Entropie de Shannon	X	X	P_{ij} la probabilité d'état d'une ressource donnée, M la quantité de ressources et N le nombre d'états possibles.	$C_s = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{ij} \log_2 (P_{ij})$	Difficulté d'obtention des valeurs d'entrée	(Modrak & Soltysova, 2023a)
	Complexité de la conception structurelle	X	X	N_j le nombre de couplages par paramètre de conception; k le nombre de colonnes de la matrice de structure de conception	$S_{DC} = \sum_{j=1}^k N_j \ln N_j$	Mesure la complexité structurelle du produit	(Modrak & Soltysova, 2023a)

Catégorie	Métrique	Type de complexité	Nature	Valeur d'entrée	Équation	Limites	Références
		Dynamique	Objectif				
Indices de complexité	Complexité de l'assemblage du produit	X	X	n_p le nombre de pièces distinctes du produit ; N_p le nombre total de pièces du produit ; $CI_{produit}$ l'indice de complexité géométrique du produit ; n_s le nombre de <i>fasteners</i> distincts du produit et N_s le nombre total de <i>fasteners du produit</i> .	$C_{produit} = \left(\frac{n_p}{N_p} + CI_{produit} \right) \log_2(N_p + 1) + \frac{n_s}{N_s} \log_2(N_s + 1)$	Biais des experts sur l'indice de complexité géométrique du produit	(Capponi et al., 2023a ; H. ElMaraghy et al., 2014b)
Le nouveau modèle d'évaluation de la complexité de l'assemblage d'un produit	X	X	X	n_p le nombre de pièces distinctes du produit ; N_p le nombre total de pièces du produit ; n_s le nombre de <i>fasteners</i> distincts du produit et N_s le nombre total de <i>fasteners du produit</i> .	$C_{produit} = \frac{n_p}{N_p} \log_2(N_p + 1) + \frac{n_s}{N_s} \log_2(N_s + 1)$	Mesure la complexité de l'assemblage du produit	(Capponi et al., 2023a)
Indice de Mattsson	Indice de Mattsson	X	X	Grille d'évaluation de l'indice de complexité /		Mesure qualitative de la complexité ; quantité importante de données à traiter	(Mattsson et al., 2011 ; Zeltzer et al., 2013 ; Germán Herrera Vidal, Hernández, et al., 2022)

Catégorie	Métrique	Type de complexité	Nature	Valeur d'entrée	Équation	Limites	Références
		Dynamique	Objectif				
Stabilité	Indice de complexité de structure	X	X	C_i : indices de complexité du graphe orienté de la production	$ISC = \left(\sum_{i=1}^6 C_i \right)^2 - \sum_{i=1}^n C_i^2$	Mesure la complexité de la ligne de production nécessitant au préalable le calcul des indices individuels	(H. ElMaraghy et al., 2014a)
	Représentation vectorielle	X	X	α : l'angle entre le vecteur produit et le vecteur service	$\vec{Q} = \ \vec{Q}\ \cos \vec{\alpha} + \ \vec{Q}\ \sin \vec{\alpha}$	Ne s'applique qu'aux produit-service	(Mourtzis et al., 2017)
Métrique de Bashir et Thompson	Métrique de Keating	X	X	F_j : le nombre de fonctions au niveau j que le produit doit respecter et l le nombre de niveaux	$PC = \sum_{j=1}^l F_j$	Calcule la complexité en fonction du diagramme fonctionnel du produit	(Bashir & Thomson, 1999 ; Trattner et al., 2019)
Modélisation de l'architecture de production		X	X	M : le nombre de modules constituant le produit et I le nombre d'interactions entre les modules	$C = M^2 + I^2$	Mesure la complexité sur la base de la nomenclature du produit et des interactions intermodules	(Crespo-Varela et al., 2012 ; Keating, 2000)
				S : le nombre de stations de travail ; C_s la complexité à la station s	$C = \sum_{s=1}^S C_s$	Mesure la complexité des postes de travail	(Oh et al., 2015a)

Dans le cadre de ce projet, le type de complexité qui nous intéresse est celle dite statique. Ainsi en effectuant un zoom sur celle-ci, on obtient la Figure 1.15 qui situe les métriques et décrit le requis pour la mesure de la complexité qu'elle soit liée à la structure du produit ou au processus de production.

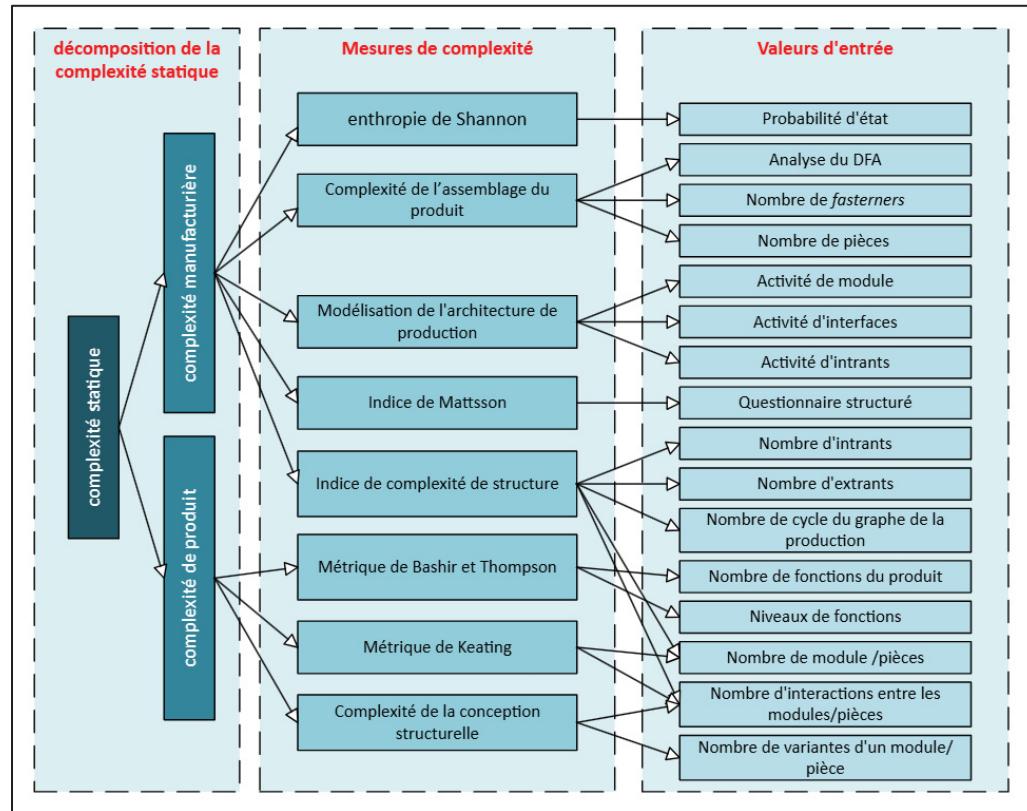


Figure 1.15 Zoom sur les métriques de la complexité statique

1.5 Conclusion

La complexité manufacturière est un concept si large qu'il est quasiment impossible de proposer une définition universelle. Plusieurs auteurs tentent d'apporter une définition, mais elle est toujours relative à l'entreprise au domaine d'application, au type de complexité. La modularité se présente comme une solution intéressante à la complexité. On remarque dans la plupart des travaux que ces concepts sont traités séparément de telle sorte qu'on pourrait croire qu'il n'existe aucun lien entre ces deux notions.

La modularité est donc cette méthode de conception qui vise à réduire la complexité structurelle du produit en le décomposant en modules indépendants liés par des interactions stables. Face à ce changement de paradigme de production, l'architecture manufacturière est contrainte de s'aligner et s'accommoder au nouveau mode de production. On parle ici de module opérationnel qui intègre le poste de travail, ses intrants et ses extrants.

De la conception à la sortie du produit de l'usine, les informations sont partagées de façon continue entre les deux architectures qui s'influencent simultanément. La modularité contribue à augmenter la flexibilité, la variété, la personnalisation et la customisation.

Les méthodes proposées pour la mesure de la modularité utilisent toutes en données d'entrées les interactions entre les nœuds du graphe orienté de la production. Du côté de la complexité, la littérature regorge d'une pléthore de métriques adaptées à des contextes spécifiques. La plupart s'intéressent à la complexité statique. Ces métriques sont regroupées en plusieurs catégories, notamment la dynamique non linéaire qui décrit le caractère imprévisible de la complexité ; la théorie de l'information inspirée de la loi de thermodynamique dont la plus populaire est l'entropie de Shannon qui utilise la probabilité des états qui est difficile à définir. (Modrak & Soltysova, 2023a) propose dans la même lancée une mesure basée sur la matrice de structure de conception du produit facilement applicable.

L'indice de complexité de Mattsson évalue de façon subjective la complexité perçue par les travailleurs à travers un questionnaire structuré suivant des critères définis. Par ailleurs on retrouve une méthode objective d'obtention de l'indice de complexité qui s'apparente aux indices de modularité.

La mesure de la complexité des produits et des procédés sert ainsi de base à la prise de décision en vue d'optimiser la conception du produit et sa ligne de production.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE

Les travaux présentés dans ce mémoire se situent dans un cadre industriel lié aux problématiques de la modularité de la production et de la complexité que celle-ci peut engendrer. La recherche est menée tout au long de deux (02) stages d'une durée totale de 12 mois effectués chez BRP. L'implication du partenaire industriel nous a donné un accès direct à l'usine de production, à la documentation nécessaire. Les interactions et la collaboration avec divers intervenants internes (l'équipe manufacturière, l'équipe de l'ingénierie) ont été cruciales pour l'atteinte de notre objectif qui est celui de développer deux indicateurs de mesure de la modularité et de la complexité manufacturière. Ce chapitre est divisé en deux parties. Une première qui décrit la méthodologie employée pour répondre aux questions liées à la modularité et dans la seconde celles liées à la complexité.

2.1 Méthodologie de mesure de la modularité

2.1.1 Justificatif du choix des indices de modularité

La littérature du domaine propose plusieurs méthodes pour estimer la modularité des produits et des systèmes d'assemblage. Elle classe l'ensemble en plusieurs catégories (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 Classification des métriques de la modularité
Tiré de Roy & Abdul-Nour (2024, pp. 13-14)

Groupes	Sous-groupes
Groupe 1. Communalité et standardisation	Indices de similarité
	Communalité des composants
	Indice de communalité
	Communalité d'interfaces
Groupe 2 : Connectivité et interfaces	Connectivité des composants
	Concept de couplage
	Substituabilité
Groupe 3 : Personnalisation et niveau de variété	Indice de variété
	Degré de customisation

Groupes	Sous-groupes
	Indice de variété de produit
Groupe 4 : Dénombrement et taille	Taille de la matrice de la structure de conception et le nombre de modules
	Nombre de composants
	Nombre d'interfaces
Groupe 5 : Niveau de modularité	Indice de groupage modulaire
	Couplage fonctionnel

Après analyse, celles qui nous ont semblé les plus adaptées à être appliquées sur le cas BRP sont les mesures du groupe 2 et du sous-groupe 1. Plus précisément les indices de réseau (voir Tableau 2.2). Ceci est en raison de la facilité d'acquisition des requis, l'utilisation directe des données primaires. Une autre raison qui motive ce choix est le fait que certaines mesures de la modularité se confondent aux mesures de complexité alors que les indices de réseaux s'intéressent aux interactions entre les différentes composantes du produit et sont ainsi propres à la modularité et ne nous rappelle la complexité à aucun moment.

Tableau 2.2 Choix des indices de modularité appliqués
Tiré de Soltysova & Modrak (2021a, pp. 2-4)

Mesure	Données d'entrée	Équations
Indice de modularité à valeur Singulière (IMS)	N le nombre de composants du système ; σ_i représente les valeurs singulières obtenues par la diagonalisation MSC	$MS = 1 - \frac{1}{N \cdot \sigma_1} \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_i (\sigma_i - \sigma_{i+1})$
Indice d'indépendance intermodules (IM)	R_i le nombre de connexions interne au module opérationnel i ; T le nombre total de relations du système et n le nombre de modules opérations	$IM = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{T}$
Indice de modularité réseau (NMI)	Le nombre d'arêtes à l'intérieur du module opérationnel w_s ; w le nombre total de connections dans le réseau ; w_s^{in} le nombre d'arêtes des intrants du module s et w_s^{out} le nombre d'arêtes pour les extrants.	$NMI = \frac{w_s}{w} - \frac{w_s^{in} + w_s^{out}}{w}$
Indice de Newman et Girvan (Q)	Le nombre de module n ; l_s le nombre d'arêtes entre les nœuds dans le module s ; L le nombre d'arêtes dans le réseau et ds la somme des degrés des nœuds dans le module	$Q = \sum_{s=1}^n \frac{l_s}{L} \times \left(\frac{ds}{2L} \right)^2$

Mesure	Données d'entrée	Équations
Indice de Modrak et Soltysova (OMI)	Le nombre de modules M ; l_s le nombre de connexions internes du module s et L le nombre total des connexions	$OMI = \frac{\sum_{s=1}^M \left(\frac{l_s}{L}\right)_s}{M \times \max\left(\frac{l_s}{L}\right)_s}$
Indice optimal de la Structure de Conception (M)	Le nombre de modules dans un réseau n ; N_j est le nombre de couplages extraits de la colonne j de la matrice de structure de conception ; k le nombre de colonnes de cette matrice de conception	$= \frac{M}{\sum_{j=1}^k N_j \times \ln N_j}$

Mesurer la modularité à partir des indices de réseau requiert le décompte des connexions au sein de l'assemblage. D'où la nécessité d'une représentation graphique qui distingue clairement les entrants indépendants que l'on considère comme des composants élémentaires, les sous-modules (*Manufacturing Assembly*) ou modules d'assemblage, les extrants ainsi que les différentes connexions de dépendance.

La Figure 2.1 ci-dessous présente un exemple d'*Assembly Process Structure* (APS) composé de sept intrants, cinq modules d'assemblage à l'issue duquel on obtient deux produits :

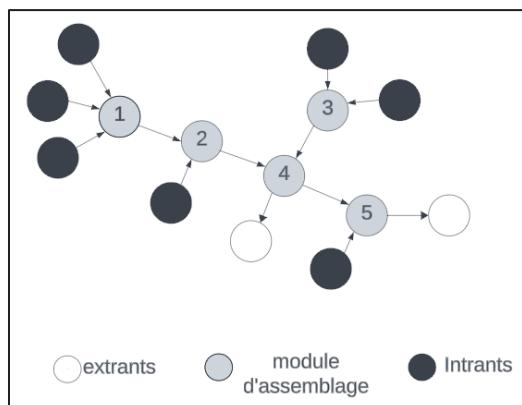


Figure 2.1 Exemple d'APS simplifié
Adapté de Soltysova & Modrak (2021b, p. 4)

Nous considérons comme entrant indépendant tout composant élémentaire du système. Les éléments d'attaches - *Fasteners* (ex. types de brides, écrous, rivets, bagues, rondelles...), les *tie-rap, tapes*, les fluides et les décalques sont exclus. Ces éléments n'ont pas grand impact sur

la modularité. De plus, en tenir en compte gonflerait artificiellement le nombre de composants avec comme conséquence de diluer l'indice.

Dans la situation actuelle, les interfaces sont exclues, car on s'intéresse à la séquence dans laquelle les pièces sont assemblées et le type de liaison utilisé importe peu. L'assemblage a recours à un certain nombre de pièces de liaison souvent important, ce qui pourrait fausser l'interprétation de l'indice de modularité. Ainsi, la standardisation des interfaces pourrait faire l'objet d'un autre indice.

À partir de cette configuration de la Figure 2.1, nous avons créé plusieurs combinaisons possibles d'assemblage (Figure 2.2). Ceci avec un seul produit final et sans tenir compte des contraintes fonctionnelles du produit final. Le but étant d'obtenir différents cas d'étude, diversifiés et élémentaires afin d'observer le comportement des indices aux changements et de pouvoir les comparer.

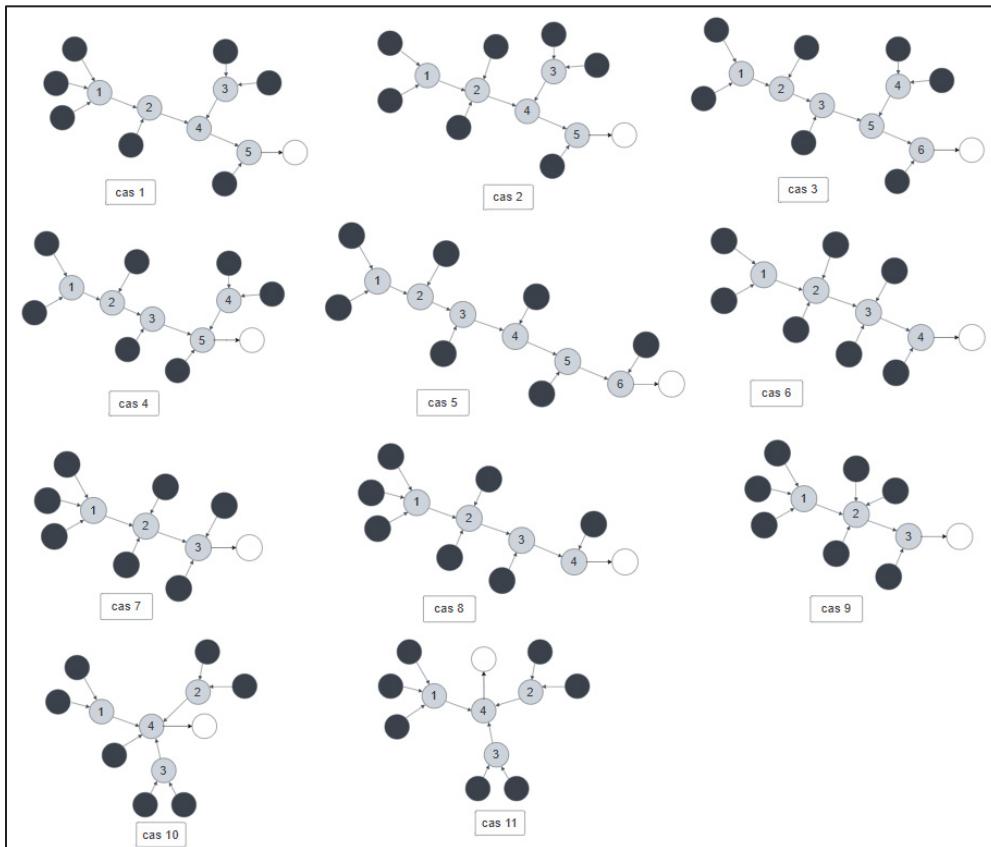


Figure 2.2 Proposition de onze (11) configurations pour le test des indices

2.1.2 Proposition d'un nouvel indice de modularité

La nouvelle métrique s'inspire de l'indice d'indépendance intermodules IM (Blackenfelt, 2001) donné par l'équation (2.1).

$$IM = \frac{R}{M} \quad (2.1)$$

Où R est le nombre de pièces primaires du réseau et M le nombre total de connexions du réseau.

Les indices de modularité retrouvés dans la littérature ne sont pas concluants. Les classements présentés aux Tableau 2.3 sont complètement disparates de celui des experts. Cependant seul l'indice d'indépendance permet une interprétation. Ainsi, ce dernier démontre que plus on crée des modules au sein d'un produit plus on est modulaire. Cependant cette conclusion n'est pas toujours pertinente voire insuffisante.

Tableau 2.3 Résultat du test de l'indice d'indépendance des modules

Cas	IM	NMI	OMI	Classement			Experts BRP
				IM	NMI	OMI	
Cas 1	36,40%	75,21%	46,67%	3	7	11	3
Cas 2	36,40%	83,47%	70,00%	3	3	5	5
Cas 3	41,70%	84,72%	58,33%	1	1	7	4
Cas 4	36,40%	83,47%	70,00%	3	3	5	6
Cas 5	41,70%	84,72%	58,33%	1	1	10	11
Cas 6	30,00%	82,00%	87,50%	6	5	1	10
Cas 7	22,20%	70,37%	77,78%	10	10	3	8
Cas 8	30,00%	73,00%	58,33%	6	8	7	9
Cas 9	22,20%	70,37%	77,78%	10	10	4	7
Cas 10	30,00%	82,00%	87,50%	9	5	1	2
Cas 11	30,00%	73,00%	58,33%	6	8	7	1

Ainsi, nous allons tenter d'améliorer le comportement de cet indice d'indépendance en intégrant la notion de niveau d'agrégation des modules en attribuant des poids par niveau. Ce qui nous amène à modifier la représentation initiale de l'APS. La Figure 2.3 est l'exemple du cas 11 des onze (11) configurations de la Figure 2.2.

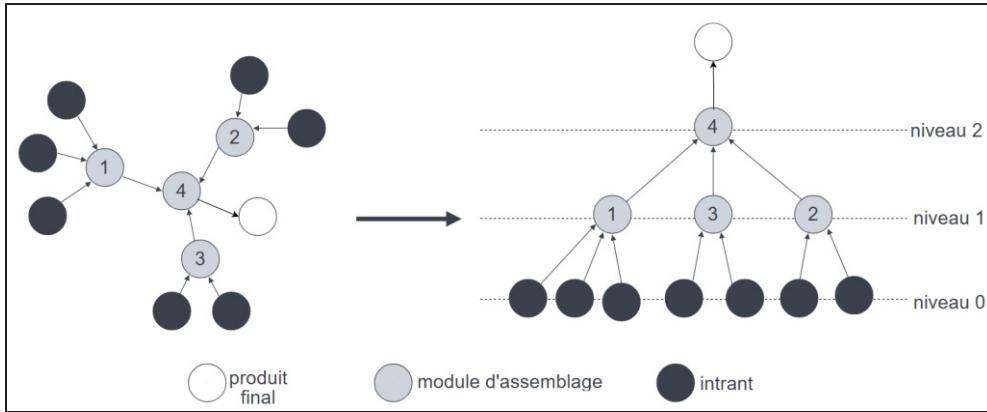


Figure 2.3 Nouvelle représentation de l'APS du produit intégrant les niveaux

La définition du nouvel indice de modularité (IM_p) exige de nouveaux requis notamment les niveaux d'agrégation des modules, le poids attribué à l'intrant ou au module d'assemblage qui est fonction du niveau dans lequel il se situe. De cette manière, on améliore la modularité en ramenant le maximum d'entrées possible aux niveaux les plus bas. Nous avons pondéré les connexions des pièces primaires. Ce qui conduit à l'équation (2.2).

$$IM_p = \left[1 - \frac{\sum_{i=0}^n p_i q_i k_i}{\sum_{i=0}^n p_i q_i m_i} \right] \times \gamma \quad (2.2)$$

Avec p_i le poids associé au niveau i , q_i le poids associé à la concentration des entrants dans les sous-assemblés au niveau i , γ le taux de modules en sous-assemblage sur l'ensemble du réseau ; k_i le nombre de connexions des pièces primaires au niveau i et m_i la somme des connexions totales du réseau au niveau i . La Figure 2.4 permet d'interpréter la valeur de l'indice c'est-à-dire que si l'indice tend vers 1 on est plus modulaire et s'il tend vers 0 alors on a affaire à un produit qui se rapproche d'une structure intégrale.

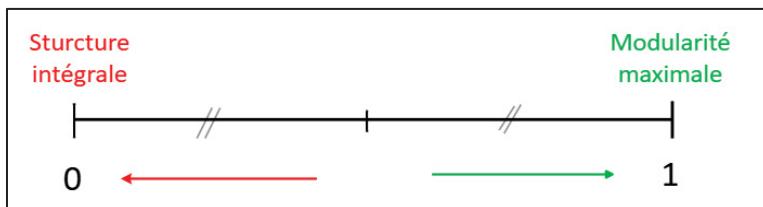


Figure 2.4 Interprétation de l'indice de modularité

2.1.3 Nomenclature et paramètres de la modularité

2.1.3.1 Nomenclature

L'application de l'équation (2.2) requiert en amont de distinguer les différents éléments constitutifs de l'APS à savoir les modules d'assemblage, les modules en sous-assemblage, les intrants en ligne principale, celles en sous-assemblage et le produit final.

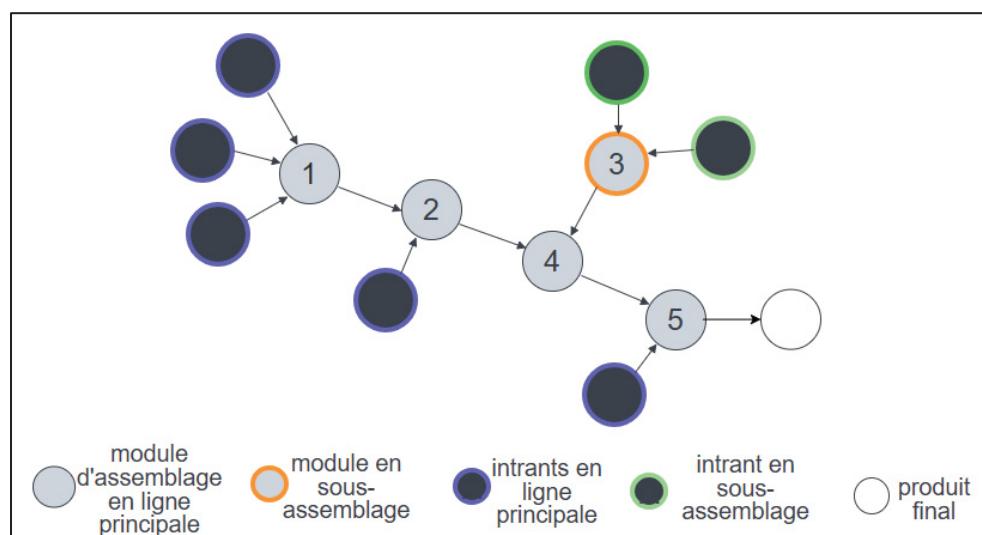


Figure 2.5 Identification les éléments constitutifs d'un APS quelconque

La Figure 2.6 identifie et dénombre ces composants pour un APS quelconque simplifié selon la nouvelle représentation.

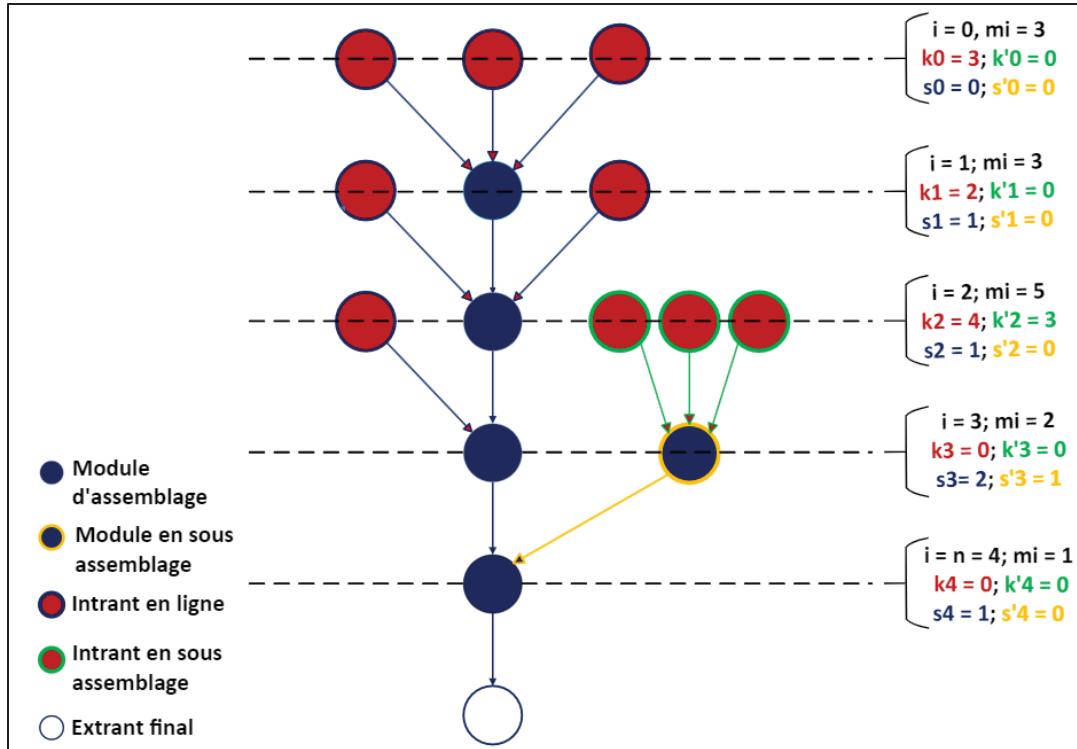


Figure 2.6 Distinction des différents éléments d'APS simplifié suivant la nouvelle représentation

Le Tableau 2.4 décrit toutes les variables utilisées dans les différentes équations relatives à l'indice de modularité.

Tableau 2.4 Description des variables de l'indice de modularité

Variable	Désignation
IM_p	Indice de modularité pondéré
i	Indice du niveau
n	Nombre de niveaux compté à partir du premier module d'assemblage jusqu'au dernier
$(\alpha_i)^i$	Suite géométrique de premier terme $\alpha_1 = 2$ et de raison 2 avec $\alpha_0 = 0$
α_i	i^{e} Terme de la base géométrique $(\alpha_i)^i$ de premier terme $\alpha_1 = 2$ et de raison 2 avec $\alpha_0 = 0$
p_i	Poids associé au niveau i
β_i	Ratio entre le nombre de modules en sous-assemblage d'un niveau i et le nombre d'entrées en sous-assemblage du niveau précédent
q_i	Poids associé aux pièces primaires en sous-assemblage au niveau i

k_i	Nombre de composants/pièces primaires ou intrants
k'_i	Nombre d'entrées/pièces primaires en sous-assemblage au niveau i
S_i	Nombre de modules d'assemblage au niveau i
S'_i	Nombre de modules en sous-assemblage au niveau i
m_i	Nombre de composants (modules d'assemblage et pièces primaires) au niveau i
γ	Poids des modules en sous-assemblage

2.1.3.2 Poids associé au niveau

Le poids p_i associé au niveau est obtenu à partir d'une base géométrique $(\alpha_i)^i$ de premier terme $\alpha_1 = 2$ et de raison 2. Par exemple, pour $i=1$ à 4, on a le Tableau 2.5 :

Tableau 2.5 Exemple d'application de la base géométrique

i	1	2	3	4
α_i	2	4	8	16

Ainsi pour garder la normalisation, c'est-à-dire $\sum p_i = 1$, on divise tous les α_i par $\sum \alpha_i$. D'où l'équation (2.3) :

$$p_i = \frac{\alpha_i}{\sum_{i=0}^n \alpha_i} \quad (2.3)$$

Avec $\alpha_0 = 0$, soit $p_0 = 0$ et $\sum_{i=0}^n p_i = 1$.

En reprenant l'exemple précédent, $\sum \alpha_i = 2 + 4 + 8 + 16 = 30$. On obtient la pondération du Tableau 2.6 :

Tableau 2.6 Exemple d'application de la pondération en fonction du niveau

i	1	2	3	4
α_i	2	4	8	16
p_i	$\frac{2}{30}$	$\frac{4}{30}$	$\frac{8}{30}$	$\frac{16}{30}$

2.1.3.3 Poids associé aux pièces primaires en sous-assemblage

Le poids des pièces en sous-assemblage q_i s'obtient à partir de β_i qui est le ratio entre le nombre de modules en sous-assemblage d'un niveau i et le nombre d'entrées en sous-assemblage du niveau précédent donné par l'équation (2.4), avec $\beta_0 = 1$ par définition.

$$\beta_i = \sqrt{\frac{s'_i + 1}{k'_{i-1} + 1}} \quad (2.4)$$

Où s'_i est le nombre de modules en sous-assemblage au niveau i et k'_{i-1} est le nombre de pièces primaires (intrants) en sous-assemblage $i - 1$. Ainsi on a q_i de l'équation (2.5).

$$q_i = 1 - \frac{\beta_i}{\sum_0^n \beta_i} \quad (2.5)$$

2.1.3.4 Poids des modules en sous-assemblage sur l'ensemble du réseau

Au départ, nous avons exploré la piste l'indice de Gini pour l'intégration de ce critère dans l'indice de modularité. Cependant, nous avons observé que le comportement de l'indice de Gini était semblable à celui du poids associé au niveau. Raison pour laquelle on a opté pour le taux γ qui est obtenu en effectuant le rapport du nombre total de modules en sous-assemblage par le nombre total de modules qu'ils soient en sous assemblage ou sur la ligne principale du montage. D'après l'équation (2.6).

$$\gamma = \frac{\sum_0^n s'_i}{\sum_{i=0}^n s_i} \quad (2.6)$$

Où s'_i est le nombre de sous-assemblés hors de la ligne principale au niveau i et s_i le nombre total de sous-assemblés au niveau i . La somme des connexions totales du réseau est obtenue par l'équation (2.7).

$$\sum_{i=0}^n m_i = \sum_{i=0}^n k_i + \sum_{i=1}^n s_i \quad (2.7)$$

2.1.4 Validité du nouvel indice de modularité

La stratégie employée dans le développement de cet indicateur de modularité est dite mixte c'est-à-dire qu'elle utilise à la fois des méthodes qualitatives et quantitatives.

De ce fait, une analyse subjective est réalisée par l'équipe de la stratégie manufacturière de BRP en collaboration avec l'ingénierie pour la validation des données en fonction de leur définition de la modularité. En ce qui concerne les cas étudiés, un classement subjectif (résultats attendus) est d'abord effectué par les experts de BRP basée sur leur définition de la modularité ensuite un autre classement cette fois objectif effectué au moyen du nouvel indice enfin on évalue la corrélation entre les deux classements.

Pour pouvoir se fier à ce nouvel indice, nous avons testé d'une part sa validité interne et sa validité externe d'autre part. La validité interne est testée par l'étude du comportement de l'indice sur les cas simples de la Figure 2.2 ensuite nous avons créé d'autres cas fictifs plus complexes pour s'assurer que l'indice fonctionne.

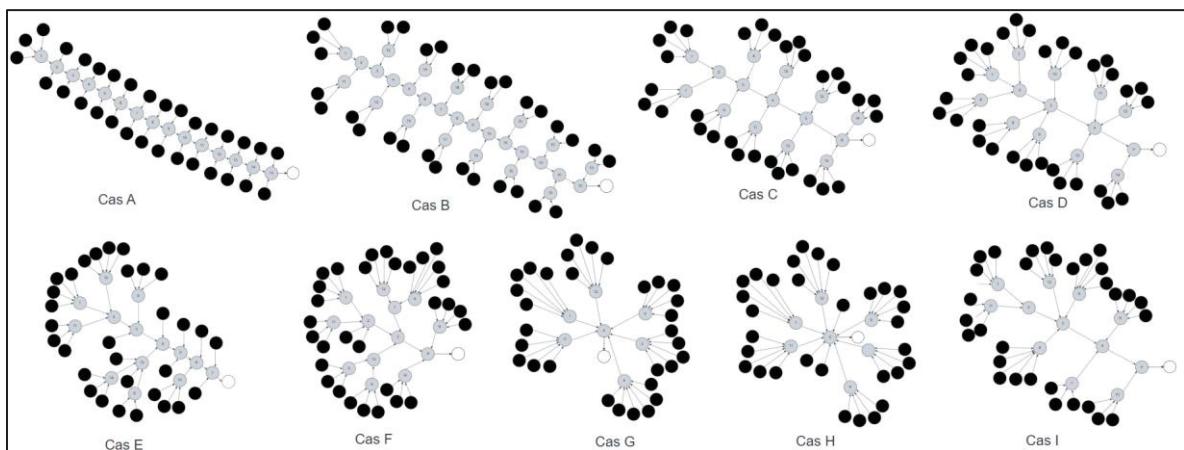


Figure 2.7 Cas d'étude complexes

Afin de s'assurer de l'applicabilité de l'indice dans les conditions réelles (validité externe), nous avons donc comparé plusieurs produits de BRP dont on savait d'avance lequel était le plus modulaire parmi lesquels des sous-assemblés de deux SKU différents de Skidoo qu'on nomme Skidoo 1 et Skidoo 2. Le requis nécessaire au calcul de l'indice de complexité de ces deux SKU est regroupé dans le Tableau 2.7 et le Tableau 2.8.

Tableau 2.7 Données Skidoo 1

Niveau	Intrants totaux	Intrants en sous-assemblage	Nombre total de modules	Nombre de modules en sous-assemblage	Nombre total de connexions
0	60	39	0	0	60
1	111	90	4	3	115
2	75	41	6	5	81
3	17	7	4	3	21
4	38	12	2	1	40
5	35	27	4	3	39
6	87	25	5	4	92
7	20	0	5	4	25
8	0	0	1	0	1
Total	443	241	31	23	474

Tableau 2.8 Données Skidoo 2

Niveau	Intrants totaux	Intrants en sous-assemblage	Nombre total de modules	Nombre de modules en sous-assemblage	Nombre total de connexions
0	48	23	0	0	48
1	147	108	3	2	150
2	75	40	5	4	80
3	14	8	4	3	18
4	47	17	2	1	49
5	43	36	4	3	47
6	93	25	5	4	98
7	29	0	5	4	34
8	0	0	1	0	1
Total	496	257	29	21	525

Ainsi, le processus de validation de notre indice est résumé par le logigramme de la Figure 2.8.

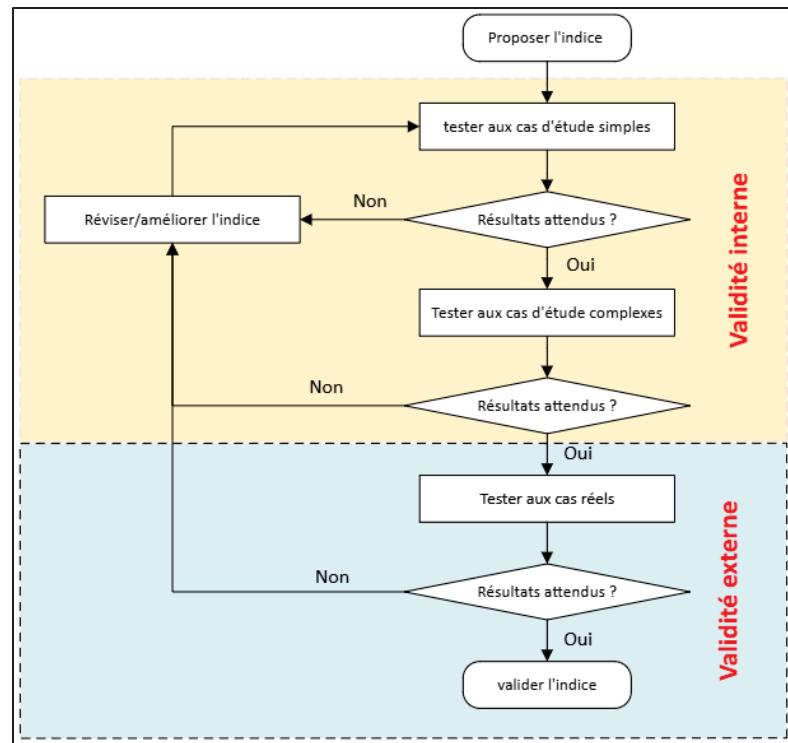


Figure 2.8 Processus de validation de l'indice

2.1.5 Méthode de collecte d'analyse des données

Notre démarche de recherche comprend la collecte de données provenant de sources d'informations multiples, notamment les séances de travail avec l'ingénierie et l'équipe manufacturière pour la validation des données primaires, la recherche documentaire (DFA, balancement, présentation de formation sur la modularité...) dans les bases de données accessibles de l'entreprise, la révision de la documentation et du contenu des instructions de travail, entre autres.

Nous avons utilisé les méthodes des statistiques descriptives à savoir le nuage de points généré par le logiciel Minitab pour observer la dispersion des classements objectifs et subjectifs des différents cas d'études. Nous avons toujours dans le même logiciel calculé l'indice de corrélation de Pearson de ces classements.

2.2 Méthodologie de mesure de la complexité manufacturière

Les méthodologies de mesure de la complexité développées dans ce projet reposent d'une part sur les métriques de la théorie de l'information et d'autre part sur les travaux de BRP qui mesurent la complexité au **poste de travail** selon différents critères. Toutefois, on souhaiterait trouver un indice unique qui combine le plus possible, voire tous, les facteurs de complexité. Ainsi nos indices s'articulent autour des facteurs suivants :

1. Les tâches (ou opérations) effectuées sur la ligne ou au poste de travail ;
2. La variété des interfaces en général et des éléments de fixation (*fasterners*) en particulier ;
3. L'entrée des modules d'assemblage ;
4. Le niveau d'automatisation des opérations ;
5. Le temps alloué ;
6. La variété des pièces.

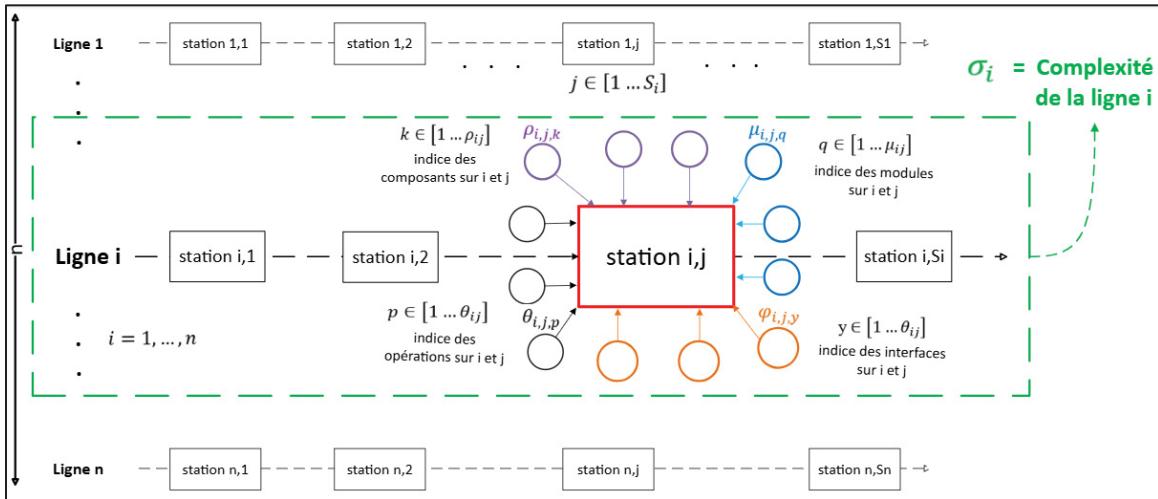


Figure 2.9 Paramètres détaillés de la complexité d'une ligne d'assemblage

Ainsi,

$$\text{complexité} = f(\text{opérations}, \text{fasterners}, \text{temps}, \text{automatisation}, \text{pièces}, \text{modules})$$

2.2.1 Considérations et nomenclature

- D'après les experts, l'entrée d'un module d'assemblage influence la complexité de la ligne cependant elle n'a pas d'effet sur la complexité du poste de travail.
- La non-redondance des critères (composants, modules, *fasterners*, opérations) réduit la complexité
- Plus le dénombre du critère est important plus haute est la complexité
- La prise en compte des opérations distinctes et des modules d'assemblage distincts n'est pas intéressante pour la détermination de l'indice de complexité. Le nombre d'opérations d'assemblage dépend de la granularité du balancement où certains peuvent être plus détaillés que d'autres ce qui pourrait jouer sur la valeur de l'indice de complexité. La complexité liée aux modules d'assemblage se verra absorbée par les autres paramètres du fait du nombre très réduit.

Ainsi, l'expression précédente de la complexité est réduite à quatre paramètres à savoir le temps, le nombre de pièces, le nombre de *fasterners* et le niveau d'automatisation. D'où,

$$\text{complexité} = f(\text{temps}, \text{pièces}, \text{fasterners}, \text{automatisation}).$$

Le Tableau 2.9 ci-dessous présente les différents paramètres nécessaires à la compréhension des indices de complexité qui suivront.

Tableau 2.9 Nomenclature des paramètres de complexité

Variable	Signification
σ	La complexité du processus complet de l'assemblage du produit.
σ_i	Complexité de la ligne i
σ_{ij}	Indice de complexité du poste de travail j de la ligne i
i	Indice pour la ligne, $i \in [1 \dots n]$
n	Nombre de lignes qui composent le processus complet de l'assemblage
S_i	Nombre de postes de travail de la ligne i
j	Indice pour le poste de travail, $j \in [1 \dots S_i]$

Variable	Signification
k	Indice pour le composant du poste de travail j sur la ligne i , $k \in [1 \dots \rho_{ij}]$
l	Indice pour les <i>fasteners</i> du poste de travail j sur la ligne i , $l \in [1 \dots \varphi_{ij}]$
p	Indice pour les opérations du poste de travail j sur la ligne i , $p \in [1 \dots \theta_{ij}]$
ω_ρ	Poids des composants du procédé complet $\omega_\rho \in [0,1]$
ω_{ρ_i}	Poids des composants de la ligne i , $\omega_{\rho_i} \in [0,1]$ (Eq. (2.9))
$\omega_{\rho_{ij}}$	Poids des composants du poste de travail j de la ligne i , $\omega_{\rho_{ij}} \in [0,1]$ (Eq.(1.9))
ρ	Nombre total de composants du processus complet de l'assemblage du produit, $\rho = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{S_i} \rho_{ij}$
ρ'	Nombre total de composants du processus complet de l'assemblage du produit, $\rho' = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{S_i} \rho'_{ij}$ avec $\rho' \leq \rho$
ρ_i	Nombre de composants de la ligne i , $\rho_i = \sum_{j=1}^{S_i} \rho_{ij}$
ρ'_i	Nombre de composants distincts, c'est-à-dire comptés sans doublons sur la ligne i , $\rho' = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{S_i} \rho'_{ij}$ avec $(\rho'_i \leq \rho_i)$
ρ_{ij}	Nombre de composants du poste de travail j de la ligne i , $\rho_{ij} > 0$.
ρ'_{ij}	Nombre de composants distincts, c'est-à-dire comptés sans doublons du poste de travail j sur la ligne i ($\rho'_{ij} \leq \rho_{ij}$)
θ	Nombre total d'opérations du processus complet de l'assemblage du produit, $\theta = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{S_i} \theta_{ij}$
θ'	Nombre d'opération automatisées du procédé $\theta' \leq \theta$
θ_i	Nombre d'opérations de la ligne i , $\theta_i = \sum_{j=1}^{S_i} \theta_{ij}$
θ'_i	Nombre d'opérations automatisées de la ligne i ($\theta'_i \leq \theta_i$)
θ_{ij}	Nombre d'opérations du poste de travail j de la ligne i , $\theta_{ij} > 0$
θ'_{ij}	Nombre d'opérations automatisées du poste de travail j sur la ligne i ($\theta'_{ij} \leq \theta_{ij}$)

Variable	Signification
ω_φ	Poids des <i>fasterners</i> du procédé complet
ω_{φ_i}	Poids des <i>fasterners</i> de la ligne i , $\omega_{\varphi_i} \in [0,1]$ (Eq.(1.10))
$\omega_{\varphi_{ij}}$	Poids des <i>fasterners</i> du poste de travail j de la ligne i , $\omega_{\varphi_{ij}} \in [0,1]$ (Eq.(1.11))
φ	Nombre total de <i>fasterners</i> du processus complet de l'assemblage du produit, $\varphi = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{S_i} \varphi_{ij}$
φ'	Nombre de <i>fasterners</i> distincts du procédé complet, c'est-à-dire compté sans doublons ($\varphi' \leq \varphi$)
φ_i	Nombre de <i>fasterners</i> de la ligne i , $\varphi_i = \sum_{j=1}^{S_i} \varphi_{ij}$
φ'_i	Nombre de <i>fasterners</i> distincts, c'est-à-dire comptés sans doublons sur la ligne i ($\varphi'_i \leq \varphi_i$)
φ_{ij}	Nombre de <i>fasterners</i> du poste de travail j de la ligne i , $\varphi_{ij} > 0$
φ'_{ij}	Nombre de <i>fasterners</i> distincts, c'est-à-dire comptés sans doublons du poste de travail j sur la ligne i ($\varphi'_{ij} \leq \varphi_{ij}$)
t_{ij}	Temps de cycle du poste de travail j de la ligne i , [min]
t_i	Temps de cycle de la ligne i , [min], $t_i = \sum_{j=1}^{S_i} t_{ij}$, [min]
t	Temps de cycle du produit, [min], $t = \sum_{i=1}^n t_i$, [min]

2.2.2 Pondération des paramètres de complexité

Le poids relatif aux composants ou pièces primaires du procédé complet $\omega_\rho \in [0,1]$ exprimé par l'équation (2.8) est obtenu en effectuant le rapport du nombre de pièces distinctes ρ' sur le nombre de pièces total ρ qui constituent le produit :

$$\omega_\rho = \frac{\rho'}{\rho} = \frac{\rho'}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{S_i} \rho_{ij}} \quad (2.8)$$

Aussi, on peut déduire d'une part le poids relatif aux pièces de la ligne i , $\omega_{\rho_i} \in [0,1]$ qui est donné par :

$$\omega_{\rho_i} = \frac{\rho'_i}{\rho_i} = \frac{\rho'_i}{\sum_{j=1}^{S_i} \rho_{ij}} \quad (2.9)$$

Et d'autre part le poids relatif aux pièces du poste de travail j de la ligne i , $\omega_{\rho_{ij}} \in [0,1]$ donné par :

$$\omega_{\rho_{ij}} = \frac{\rho'_{ij}}{\rho_{ij}} \quad (2.10)$$

Le poids relatif aux *fasterners* qui rentrent dans procédé complet d'assemblage du produit $\omega_{\varphi} \in [0,1]$ exprimé par l'équation (2.11) est obtenu en effectuant le rapport du nombre du nombre de *fasterners* distincts φ' sur le nombre de *fasterners* total φ du produit :

$$\omega_{\varphi} = \frac{\varphi'}{\varphi} = \frac{\varphi'}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{S_i} \varphi_{ij}} \quad (2.11)$$

Aussi, on peut déduire d'une part le poids relatif aux *fasterners* de la ligne i , $\omega_{\varphi_i} \in [0,1]$ qui est donné par :

$$\omega_{\varphi_i} = \frac{\varphi'_i}{\varphi_i} = \frac{\varphi'_i}{\sum_{j=1}^{S_i} \varphi_{ij}} \quad (2.12)$$

Et d'autre part le poids relatif aux *fasterners* du poste de travail j de la ligne i , $\omega_{\varphi_{ij}} \in [0,1]$ qui est donné par :

$$\omega_{\varphi_{ij}} = \frac{\varphi'_{ij}}{\varphi_{ij}} \quad (2.13)$$

Le poids lié aux opérations automatisées ou coefficient d'automatisation de procédé complet d'assemblage du produit $\omega_{\theta} \in [0,1]$ exprimé par l'équation (2.14) est obtenu en effectuant le rapport du nombre du nombre d'opérations automatisées θ' sur le nombre total d'opérations d'assemblage du produit θ :

$$\omega_\theta = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{\theta'}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{S_i} \theta_{ij}} \quad (2.14)$$

Ainsi, on déduit d'une part le poids relatif aux opérations automatisées de la ligne i , $\omega_{\theta_i} \in [0,1]$ donné par :

$$\omega_{\theta_i} = \frac{\theta'_i}{\theta_i} = \frac{\theta'_i}{\sum_{j=1}^{S_i} \theta_{ij}} \quad (2.15)$$

Et d'autre part le poids relatif aux opérations automatisées du poste de travail j de la ligne i , $\omega_{\theta_{ij}} \in [0,1]$ qui est donné par :

$$\omega_{\theta_{ij}} = \frac{\theta'_{ij}}{\theta_{ij}} \quad (2.16)$$

Tableau 2.10 Récapitulatif des poids selon le niveau de mesure de la complexité

Poids	Procédé	Ligne	Poste de travail
Composants/Pièces	$\omega_\rho = \frac{\rho'}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{S_i} \rho_{ij}}$	$\omega_{\rho_i} = \frac{\rho'_i}{\sum_{j=1}^{S_i} \rho_{ij}}$	$\omega_{\rho_{ij}} = \frac{\rho'_{ij}}{\rho_{ij}}$
Fasterners	$\omega_\varphi = \frac{\varphi'}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{S_i} \varphi_{ij}}$	$\omega_{\varphi_i} = \frac{\varphi'_i}{\sum_{j=1}^{S_i} \varphi_{ij}}$	$\omega_{\varphi_{ij}} = \frac{\varphi'_{ij}}{\varphi_{ij}}$
Automatisation	$\omega_\theta = \frac{\theta'}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{S_i} \theta_{ij}}$	$\omega_{\theta_i} = \frac{\theta'_i}{\sum_{j=1}^{S_i} \theta_{ij}}$	$\omega_{\theta_{ij}} = \frac{\theta'_{ij}}{\theta_{ij}}$

2.2.3 Métriques de complexité proposées

La première voie envisageable pour la mesure de la complexité manufacturière est celle de l'entropie de Shannon basée sur le modèle sommatif de l'équation (2.17) ci-après

$$\sigma = \log_2 t + \omega_\rho \log_2 \rho + \omega_\varphi \log_2 \varphi + \omega_\theta \log_2 \theta \quad (2.17)$$

Du point de vue de la ligne et du poste de travail on aura respectivement les équations

$$\sigma_i = \log_2 t_i + \omega_{\rho_i} \log_2 \rho_i + \omega_{\varphi_i} \log_2 \varphi_i + \omega_{\theta_i} \log_2 \theta_i \quad (2.18)$$

$$\sigma_{ij} = \log_2 t_{ij} + \omega_{\rho_{ij}} \log_2 \rho_{ij} + \omega_{\varphi_{ij}} \log_2 \varphi_{ij} + \omega_{\theta_{ij}} \log_2 \theta_{ij} \quad (2.19)$$

La deuxième voie pour la mesure de la complexité manufacturière est celle basée sur le modèle multiplicatif de l'équation (2.20) :

$$\sigma = \sqrt[4]{\log_2 t \times \omega_\rho \log_2 \rho \times \omega_\varphi \log_2 \varphi \times \omega_\theta \log_2 \theta} \quad (2.20)$$

Du point de vue de la ligne et du poste de travail, on aura respectivement les équations (2.21) et (2.22) :

$$\sigma_i = \sqrt[4]{\log_2 t_i \times \omega_{\rho_i} \log_2 \rho_i \times \omega_{\varphi_i} \log_2 \varphi_i \times \omega_{\theta_i} \log_2 \theta_i} \quad (2.21)$$

$$\sigma_{ij} = \sqrt[4]{\log_2 t_{ij} \times \omega_{\rho_{ij}} \log_2 \rho_{ij} \times \omega_{\varphi_{ij}} \log_2 \varphi_{ij} \times \omega_{\theta_{ij}} \log_2 \theta_{ij}} \quad (2.22)$$

La dernière voie pour la mesure de la complexité manufacturière est celle basée sur la distance euclidienne de l'équation

$$\sigma = \sqrt{(\log_2 t)^2 + (\omega_\rho \log_2 \rho)^2 + (\omega_\varphi \log_2 \varphi)^2 + (\omega_\theta \log_2 \theta)^2} \quad (2.23)$$

Du point de vue de la ligne et du poste de travail, on aura respectivement les équations (2.24) et (2.25) :

$$\sigma_i = \sqrt{(\log_2 t_i)^2 + (\omega_{\rho_i} \log_2 \rho_i)^2 + (\omega_{\varphi_i} \log_2 \varphi_i)^2 + (\omega_{\theta_i} \log_2 \theta_i)^2} \quad (2.24)$$

$$\sigma_{ij} = \sqrt{(\log_2 t_{ij})^2 + (\omega_{\rho_{ij}} \log_2 \rho_{ij})^2 + (\omega_{\varphi_{ij}} \log_2 \varphi_{ij})^2 + (\omega_{\theta_{ij}} \log_2 \theta_{ij})^2} \quad (2.25)$$

2.2.4 Étude des fonctions de complexité et choix du meilleur descripteur

Pour étudier le comportement des fonctions de complexité décrites précédemment, nous allons calculer les limites à l'infinie pour chacun des paramètres des équations étant donné qu'on a affaire à des fonctions croissantes et continues sur \mathbb{R}^+ ainsi que la limite lorsque le dénombrement du critère sans doublon tend vers le dénombrement du critère total par exemple $\lim_{\rho' \rightarrow \rho} \sigma$. Pour choisir laquelle des trois métriques décrit au mieux la complexité de BRP, nous avons tout d'abord choisi un produit très bien maîtrisé par l'équipe manufacturière. Un produit sur lequel des analyses des coûts de complexité avaient au préalable été effectuées. Étant donné le nombre important de pièces qui constituent le produit, nous avons choisi sept (7) lignes plus ou moins allégées par rapport aux autres, c'est-à-dire, les moins chargées en pièces et *fasterners* dans l'optique de faciliter la tâche de classification pour les experts en fonction de leur maîtrise du procédé. Les données de ces lignes sont présentées dans le Tableau 2.11 :

Tableau 2.11 Lignes sujettes aux tests des métriques de complexité

Ligne	Nombre de pièces	Nombre de pièces distinctes	Nombre de fasterners	Nombre de fasterners distincts
Line D	179	8	3698	129
Line M	176	4	948	23
Line B	294	6	4542	98
Line H	76	6	1766	73
Line U	98	5	1760	126
Line V	417	59	1550	98
Line G	968	46	3062	73

Une fois les différents classements obtenus, un test de corrélation suivra pour déterminer lequel des modèles répond au mieux aux attentes de BRP en termes d'appréciation de la complexité. La démarche employée est décrite par la Figure 2.10. En résumé, le background a été établi ensuite nous avons proposé trois (03) modèles de mesure de la complexité manufacturière dont les limites sont calculées à l'infinie afin de déterminer si les fonctions génèrent les comportements attendus. Ensuite les fonctions sont testées sur des lignes d'assemblage qui

vont générer un classement qui sera comparé à celui des experts à travers un test de la corrélation et enfin des conclusions seront tirées.

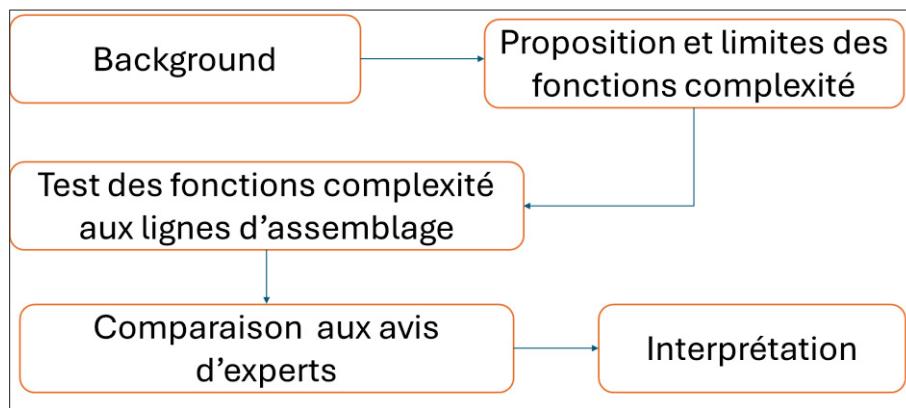


Figure 2.10 Démarche méthodologique de mesure de la complexité

CHAPITRE 3

ÉTUDE DE LA MODULARITÉ

3.1 Test du nouvel indice de modularité aux cas d'étude fictifs

L'application du nouvel indice de modularité requiert un certain préalable nécessaire à la détermination des variables de modularité. Ainsi le Tableau 3.1 regroupe toutes ces données préliminaires obtenues des APSs des cas d'étude simples et complexes :

Tableau 3.1 Données préliminaires au calcul de l'indice de modularité

Cas	Nombre de niveaux n	Nombre total d'entrées k	Nombre d'entrées en sous-assemblage k'	Nombre total de modules opérationnel s	Nombre de modules opérationnel en sous-assemblage s'	Nombre total de connexions m
Cas simples						
Cas 1	4	7	2	5	1	12
Cas 2	4	7	2	5	1	12
Cas 3	5	7	2	6	1	13
Cas 4	4	7	2	5	1	12
Cas 5	6	7	0	6	0	13
Cas 6	4	7	0	4	0	11
Cas 7	3	7	0	3	0	10
Cas 8	4	7	0	4	0	11
Cas 9	3	7	0	3	0	10
Cas 10	2	7	4	4	2	11
Cas 11	2	7	4	4	2	11
Cas complexes						
Cas A	15	31	0	15	0	46
Cas B	15	31	28	29	14	60
Cas C	6	31	27	15	9	46
Cas D	5	31	27	14	9	45
Cas E	7	31	20	14	7	45
Cas F	4	31	25	13	9	44
Cas G	2	31	26	7	5	38
Cas H	2	31	24	7	5	38
Cas I	5	31	27	12	7	43

On rappelle que les configurations des cas simples sont toutes composées de sept (7) intrants et les modules opérationnels ou d'assemblage varient entre trois (3) et six (6). Leur représentation en niveau d'agrégation est donnée par la Figure 3.1.

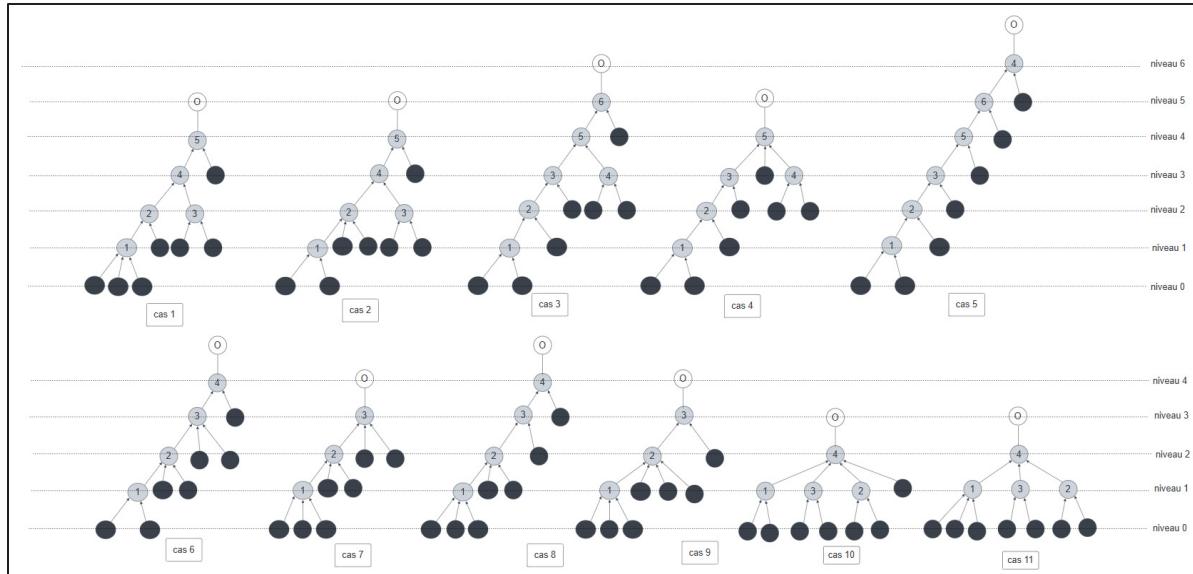


Figure 3.1 Représentation en niveaux des cas d'étude simples

Les valeurs de l'indices et les classements des cas d'études simples selon l' IM_p et les experts de BRP sont regroupés dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2 Résultats de l'indice de modularité en % pour les cas simples

Cas	IMp	Classement IMp	Classement BRP
Cas 1	28,43%	3	3
Cas 2	27,30%	4	5
Cas 3	23,39%	6	4
Cas 4	25,36%	5	6
Cas 5	11,17%	11	11
Cas 6	15,00%	10	10
Cas 7	17,95%	8	8
Cas 8	16,30%	9	9
Cas 9	19,44%	7	7
Cas 10	62,01%	2	2
Cas 11	75,00%	1	1

Les classements sont corrélés à 97,7% selon l'indice de Pearson à 95%. Les résultats du nouvel indice corroborent à ceux des experts de BRP à l'exception des cas 2,3 et 4 donc les rangs s'alternent. On peut observer sur la Figure 3.2 qu'ils sont éloignés de la droite de régression linéaire.

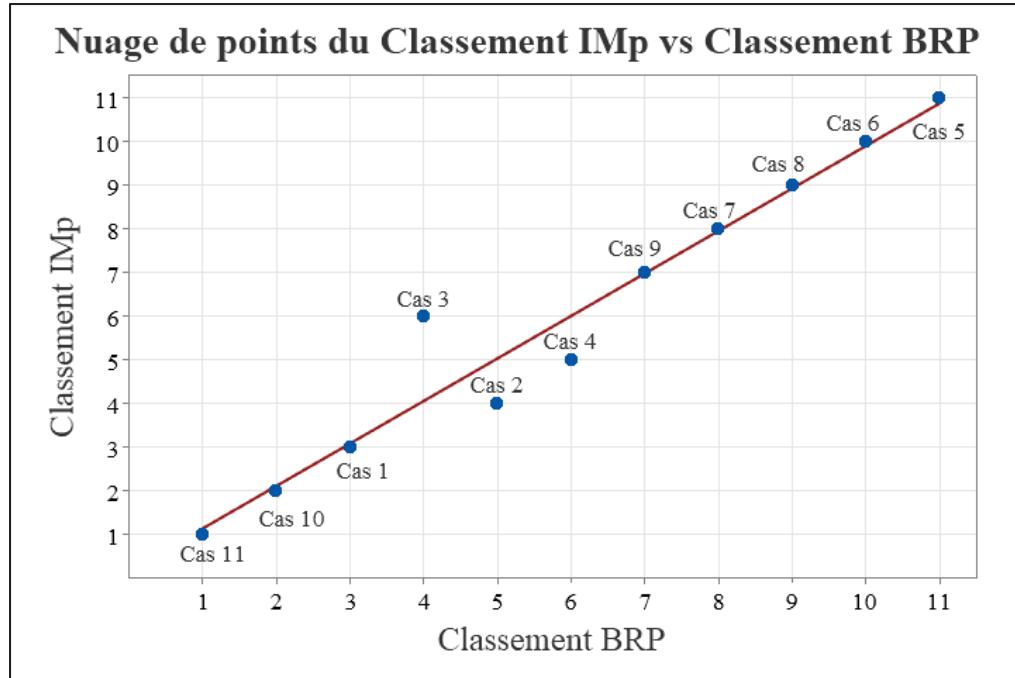


Figure 3.2 Nuage de points des cas d'étude simples

On peut observer sur la Figure 3.3 que le cas 3 partage des similarités avec les deux autres : ses trois premiers niveaux sont identiques à ceux du Cas 4 et se termine pareillement que le Cas 2.

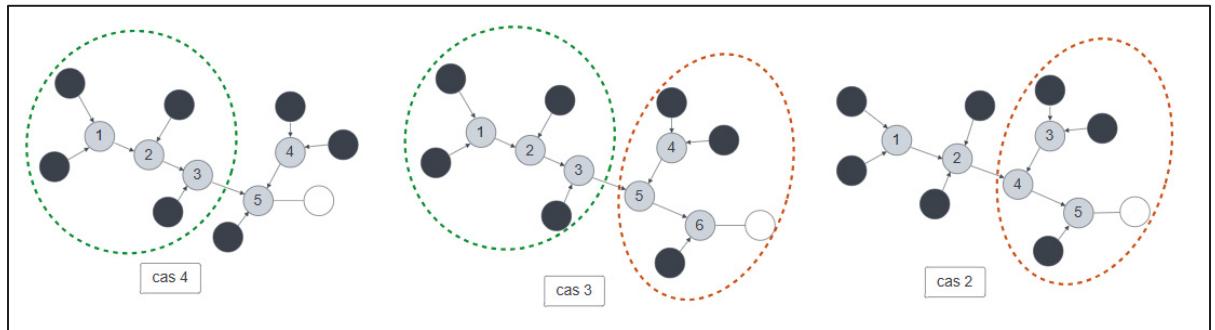


Figure 3.3 Identification des similarités entre les cas 2,3 et 4

En extirpant la variable γ de l'équation (2.6), le classement de ces cas est identique à celui des experts. Ainsi, la raison de cette disparité serait liée aux modules d'assemblage. Selon l'indice plus le taux de modules en sous-assemblage est important par rapport au nombre global de modules en sous assemblage plus on est modulaire.

Tableau 3.3 Classement des cas divergents sans le paramètre γ

Cas	IMp	Classement IMp	Classement BRP
Cas 2	68,24%	2	2
Cas 3	70,18%	1	1
Cas 4	63,40%	3	3

Aussi, le paramètre γ apporte un certain calibrage à l'indice. Les résultats de l'indice des Tableau 3.2 et Tableau 3.3, présente un écart important entre les indices pour les différents cas. Sans γ , l'indice varie de 63 à 70 % pourtant les cas d'étude ne sont clairement pas modulaires et rajoutant le paramètre l'indice descend entre 25 et 27% ce qui est plus raisonnable.

Dans la poursuite de la validation de l'indice, on l'a testé aux cas plus complexes possédant un nombre important d'intrants et de modules d'assemblage.

Les résultats de l'indice pour chacun des cas d'étude et leurs rangs subjectifs et objectifs sont présentés dans le Tableau 3.4 ci-après :

Tableau 3.4 Indice de modularité en % pour les cas complexes

Cas	IMp	Classement IMp	Classement BRP
Cas A	3.33%	9	9
Cas B	38,75%	5	8
Cas C	38,41%	6	5
Cas D	42,50%	4	4
Cas E	30,27%	8	7
Cas F	54,35%	3	3
Cas G	85,71%	1	1
Cas H	61,22%	2	2
Cas I	37,74%	7	6

Le Cas B attire particulièrement notre attention, car sa position selon l'indice incrémente le rang de ceux qui le suivre. Lorsqu'on prend l'exemple du cas C on constate que selon BRP il est classé en cinquième position pourtant l'indice le classe au sixième rang à cause du cas B. Ce qui empêche ainsi la corrélation parfaite qui actuellement est de 90%. Le nuage de points de la Figure 3.4 montre l'éloignement de la droite de régression linéaire.

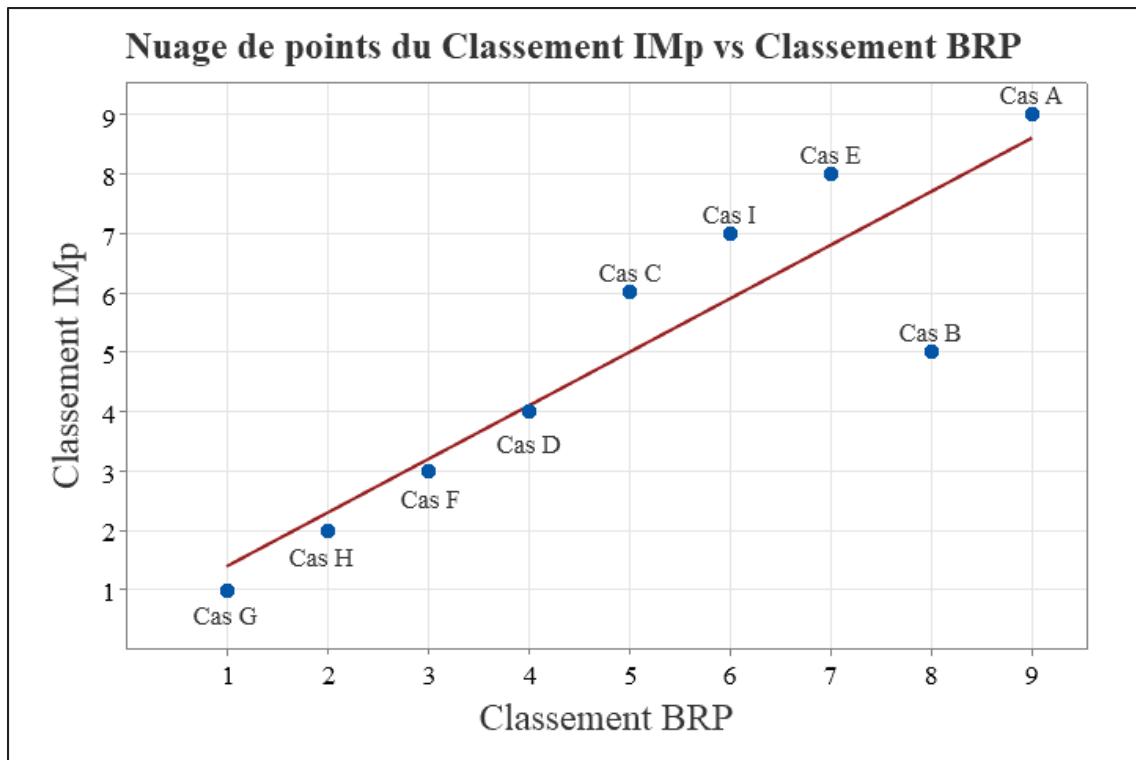


Figure 3.4 Nuage de points des cas d'étude complexes

Les résultats de l'indice qui précédent invite à poser un regard plus attentif sur les cas A, B et G de la Figure 3.5 ci-dessous :

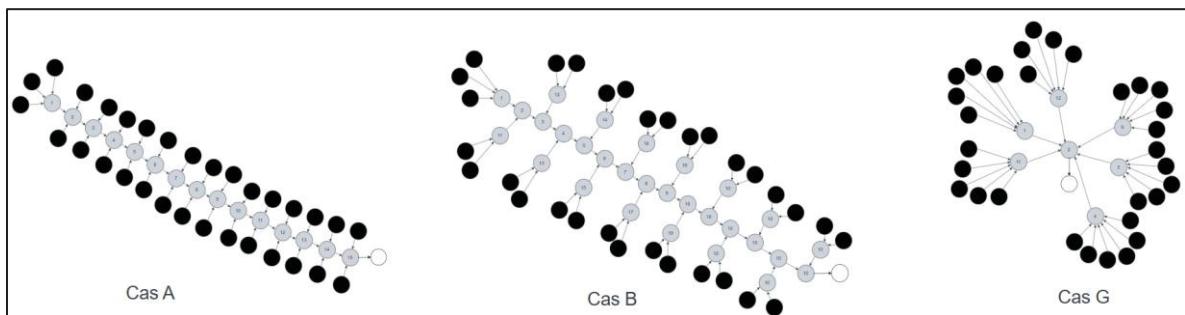


Figure 3.5 Cas intéressants des APSSs complexes

On observe que le Cas A est complètement linéaire donc pas modulaire par définition. Le Cas 2 lui est composé de petit regroupement de pièces en sous-assemblage qui rentre directement sur la ligne principale. Le Cas G est plus élaboré, car il forme au préalable des sous-assemblages matures qui vont s'assembler pour former directement le produit final.

Le test des cas complexes en l'occurrence le cas B vient présenter les limites de notre indice en ceci qu'il ne suffit pas seulement de créer de petits regroupements de pièces et ensuite les mettre ensemble pour arriver à la conclusion d'une modularité. Ce cas par rapport aux autres est celui qui possède le nombre le plus élevé de modules en sous-assemblage or le Cas G qui est le meilleur n'en possède que peu. Le Cas A reste le pire, car il est complètement linéaire, ne possède aucune ramifications hors de la ligne principale.

3.2 Application aux produits réels

Précédemment nous avons montré de façon théorique que l'on peut se fier au nouvel indice de modularité avec quelques exceptions. Nous allons le tester aux produits existants de BRP il s'agit de deux SKU de Skidoo qu'on nomme skidoo 1 et skidoo 2. Les représentations des APSs ci-dessous ne présentent pas, les intrants étant donné le nombre important. Le niveau 0 n'est pas non plus représenté, car il ne comporte que des intrants.

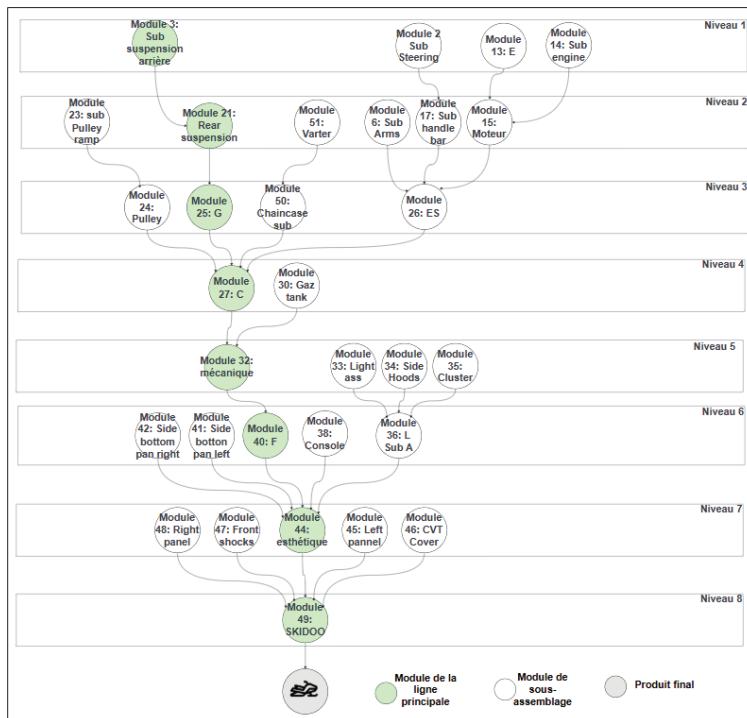


Figure 3.6 Graphe de Skidoo 1

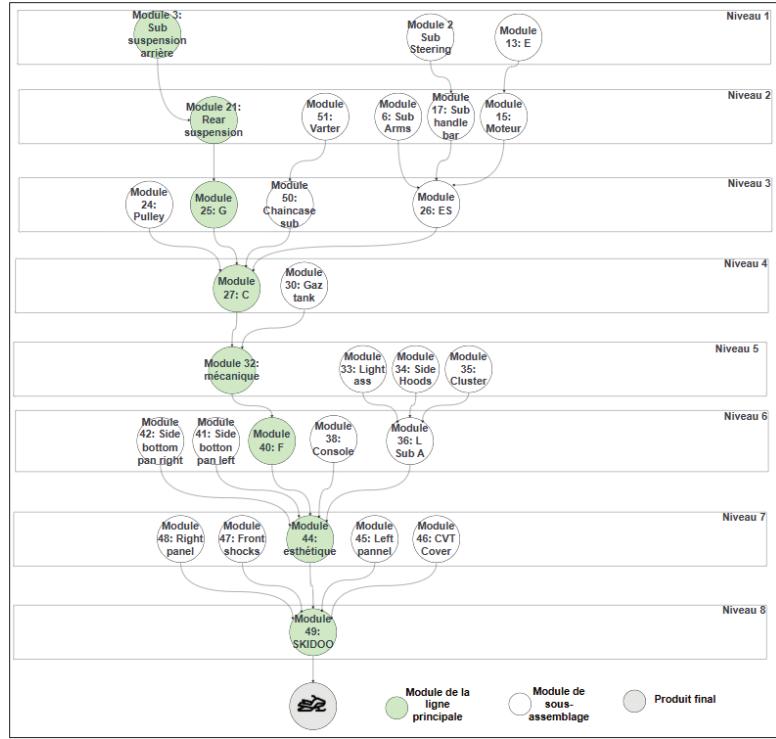


Figure 3.7 Graphe Skidoo 2

Tableau 3.5 Indice de modularité Skidoo 1 et Skidoo 2

SKU	IM_p
Skidoo 1	30,22%
Skidoo 2	27,59%

Tel que prédit par les experts, Skidoo 1 est plus modulaire que Skidoo 2.

3.3 Conclusion

Les mesures de la modularité recensées dans la littérature sont appliquées spécifiquement selon la perspective adoptée sur la notion de modularité. L'indice d'indépendance des modules ne s'est pas révélé concluant. Sur cette base, nous avons développé un indice qui prend en compte plusieurs critères de modularité. Ce dernier a été initialement testé sur des structures simples de processus d'assemblage comportant peu d'intrants, puis appliqué à des structures plus complexes avec beaucoup plus d'intrants, afin de valider la méthodologie. Les résultats obtenus révèlent une forte corrélation avec les classements établis par des experts : 97,3% pour

les cas simples et 90% pour les cas complexes. Grâce à de tels résultats, nous avons soumis un article de conférence qui a été approuvé et présenté à l'occasion du congrès international de la Canadian Society of Mechanical Engineering (CSME) 2025.

CHAPITRE 4

ÉTUDE DE LA COMPLEXITÉ

4.1 Comportement des fonctions de complexité

Les limites des modèles de complexité sont représentées au Tableau 4.1 ci-dessous :

Tableau 4.1 Limites des fonctions complexité

	Fonction sommative	Fonction multiplicative	Distance euclidienne
Temps (t) $\lim_{t \rightarrow +\infty} \sigma$	$+\infty$	$+\infty$	$+\infty$
Nombre d'opérations total (θ) $\lim_{\theta \rightarrow +\infty} \sigma$	0	0	0
Nombre d'opérations automatisées (θ') $\lim_{\theta' \rightarrow +\infty} \sigma$	$+\infty$	$+\infty$	$+\infty$
Si $\theta = \theta'$ $\lim_{\theta \rightarrow +\infty} \sigma = \lim_{\theta' \rightarrow +\infty} \sigma$	$+\infty$	$+\infty$	$+\infty$
Nombre de pièces total (ρ) $\lim_{\rho \rightarrow +\infty} \sigma$	0	0	0
Nombre de pièces distinctes (ρ') $\lim_{\rho' \rightarrow +\infty} \sigma$	$+\infty$	$+\infty$	$+\infty$
Si $\rho = \rho'$ $\lim_{\rho \rightarrow +\infty} \sigma = \lim_{\rho' \rightarrow +\infty} \sigma$	$+\infty$	$+\infty$	$+\infty$
Nombre de <i>fasteners</i> total (φ) $\lim_{\varphi \rightarrow +\infty} \sigma$	0	0	0
Nombre de <i>fasteners</i> distincts (φ') $\lim_{\varphi' \rightarrow +\infty} \sigma$	$+\infty$	$+\infty$	$+\infty$
Si $\varphi = \varphi'$ $\lim_{\varphi \rightarrow +\infty} \sigma = \lim_{\varphi' \rightarrow +\infty} \sigma$	$+\infty$	$+\infty$	$+\infty$

Au regard du calcul des limites ci-dessus, nous constatons que les fonctions complexité tendent vers l'infini lorsque le temps, le nombre de de pièces distinctes, le nombre de pièces de fixation distinctes, le nombre d'opérations automatisées tendent vers l'infini. Cela signifie :

- D'une part que plus le temps d'assemblage d'un produit est long plus son procédé est complexe ; par conséquent plus le temps de cycle d'une ligne ou d'un poste est long, grande est la complexité.
- D'autre part si le procédé ou la ligne ou le poste de travail possède une très grande variété de pièces, de fasteners et un nombre important d'opérations automatisées, la complexité sera conséquemment grande. C'est donc la variété qui engendre la complexité.

On observe également que les limites des fonctions lorsque le nombre de de pièces, le nombre de pièces de fixation et le nombre d'opérations tendent vers zéro sont nulles. Cependant si toutes les composants primaires et les pièces de fixation sont distincts et les opérations totalement automatisées, la complexité tendra vers l'infini. C'est donc la variété qui engendre la complexité. D'autre part la quantité n'engendre pas forcément de la complexité; cela dépend de la redondance ou non des paramètres.

4.2 Application des métriques et choix du meilleur descripteur

L'application des trois modèles de complexité aux cas d'études a résulté au classement des lignes au Tableau 4.2 accompagné de l'avis des experts.

Tableau 4.2 Classements selon les modèles de complexité et celui des experts

Lignes	Classements							
	Somme	Produit	Distance euclidienne	BRP1	BRP2	BRP3	BRP4	Moyenne BRP
Ligne 1	1	4	1	4	5	5	4	5
Ligne 2	7	7	7	7	7	7	7	7
Ligne 3	2	3	2	6	6	6	6	6
Ligne 4	3	5	3	1	1	1	1	1
Ligne 5	5	1	5	2	2	3	3	3
Ligne 6	6	2	6	3	3	2	2	2
Ligne 7	4	6	4	5	4	4	5	4

Tableau 4.3 Corrélations modèles de complexité et les classements des experts

	Somme	Produit	Distance euclidienne	BRP1	BRP2	BRP3
Produit	-0,071					
Distance euclidienne	0,857	0,107				
BRP1	0,000	0,500	0,143			
BRP2	-0,036	0,429	0,036	0,964		
BRP3	0,000	0,393	0,000	0,929	0,964	
BRP4	0,036	0,464	0,107	0,964	0,929	0,964

On observe une forte corrélation entre les classements des experts qui varie de 92 à 96% c'est le cas également entre les modèles somme et distance euclidienne qui est de 86% alors que le modèle produit n'est corrélé avec aucun des deux modèles. Cependant le modèle produit est celui qui remporte les taux de corrélation les plus élevés bien qu'insuffisant pour conclure.

La droite de régression linéaire obtenue est présentée

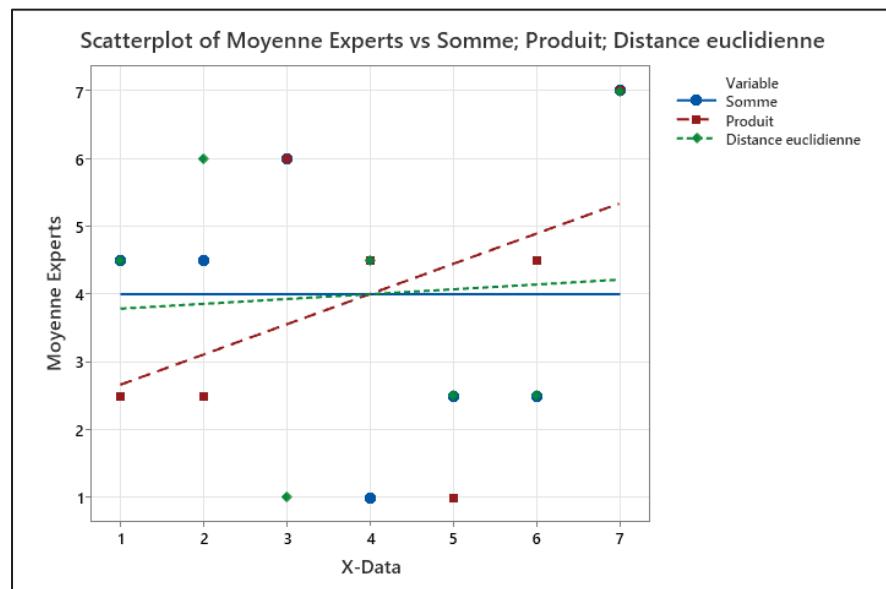


Figure 4.1 Droites de régression linéaire des trois modèles et la moyenne des classements de BRP

On y constate les nuages de points des fonctions par rapport à la moyenne des classements des experts ne suivent aucune régression.

Tableau 4.4 Corrélation modèles de complexité et moyenne BRP

	Somme	Produit	Distance euclidienne
Produit	-0,071		
Distance euclidienne	0,857	0,107	
Moyenne Experts	0,000	0,455	0,073

La fonction somme est tirée des travaux de (Samy & ElMaraghy, 2010) revisités par (Capponi, Mastrogiacomo, & Franceschini, 2023b) basée sur l'enthropie de Shannon qui prends en compte uniquement les composants primaires et les pièces de fixation auxquels on a rajouté le critère temps et automatisation des opération. Les résultats obtenus dans cette étude viennent remettre en question les travaux de ces auteurs. Car les résultats produits par l'indice ne corroborent pas avec les attentes des experts avec des indices de corrélation très faibles.

4.3 Conclusion

La complexité du domaine statique est une fonction qui dépend du temps de cycle, du coefficient d'automatisation des opérations, du nombre de fasterners et de pièces. Les trois métriques de complexité proposées sont inspirées de l'entropie de Shannon dont le modèle sommatif existe déjà dans la littérature. Ces fonctions permettent de mesurer la complexité soit au niveau du poste de travail, soit de la ligne ou encore du procédé global. Ceci en vue de comparer un produit à un autre, identifier quel poste ou quelle ligne est plus complexe. Ainsi les données de l'équation de complexité vont dépendre du niveau par rapport auquel on souhaite évaluer la complexité.

Les limites des fonctions à l'infini traduisent le comportement souhaité, car plus le temps de cycle est long, plus le nombre d'opérations automatisées est important, plus les pièces et les fasterners diffèrent, plus grande est la complexité. On observe clairement que ces fonctions de complexité malgré qu'elles génèrent les comportements attendus n'épousent pas la perception de la complexité de nos experts. Ceci pourrait se justifier d'une part par la non-dissociation de la complexité statique de celle dynamique par les experts à qui l'exercice de la classification

des lignes a été soumis. Ces résultats ont fait l'objet d'une communication écrite (Annexe I) publiée à l'occasion du 92^e congrès de l'Association Canadienne-Française pour l'Avancement des Sciences (ACFAS).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Parvenu au terme de ce projet où il était question de développer des indicateurs de performances de mesures de la modularité et de la complexité de l'assemblage des produits. Il en ressort de la modularité que les résultats obtenus révèlent une forte corrélation avec les classements établis par des experts : 97,3% pour les cas simples, 90% pour les cas complexes et les produits existants comparés entre eux ont produits le classement voulu. L'atteinte d'une parfaite corrélation est dû au fait de l'alternance des rangs entre les cas d'études 2, 3 et 4 pour les structures fictives simples, et la position du cas B pour les structures complexes. Ainsi, une analyse approfondie de ces écarts observés, constituerait une piste de réflexion pour des travaux futurs. Cela permettra de mieux cerner le comportement de l'indice, d'en identifier les limites et d'envisager des axes d'amélioration.

En ce qui concerne la complexité, nous avons développé trois (3) modèles de mesure basés sur la théorie de l'information avec l'entropie de Shannon. Bien que les fonctions complexité génèrent les comportements escomptés, elles ne corroborent pas avec les résultats attendus pour le classement des lignes. Le modèle sommatif et celui de la distance euclidienne obtiennent une corrélation nulle tandis que la fonction multiplicative atteint 45% qui est insuffisant pour la validation de la méthode. Ainsi, tout porte à croire que l'analyse de la complexité par les experts n'arrive pas à dissocier la complexité statique de celle dynamique, car ceux-ci sont très portés vers les phénomènes aléatoires difficiles à contrôler qui surviennent sur les lignes pourtant les méthodes de mesure proposées visent la complexité statique. D'autre part il est fort possible que la perception ou les objectifs de la complexité diffèrent du niveau stratégique au niveau opérationnel. Ainsi le développement d'une mesure fiable est freiné par le caractère profondément subjectif de la complexité.

RECOMMANDATIONS

Les 30 crédits alloués à ce travail de recherche ont été répartis sur 4 sessions bien que nous ayons pris une session supplémentaire le temps demeurait insuffisant pour explorer de fond en comble ce sujet. De ce fait, des recommandations ont été formulées :

Pour BRP :

- 1- Intégrer progressivement l'indicateur de modularité dans la conception ou la refonte manufacturière afin de comparer différentes architectures ;
- 2- Former le personnel aux principes et à l'utilisation de l'indice de modularité
- 3- Développer un outil de calcul et de suivi dans le temps de l'indicateur ou bien intégrer l'indice de modularité dans les outils *Product Lifecycle Management* (PLM).
- 4- Harmoniser les objectifs de mesure de la complexité manufacturière tant au niveau stratégique qu'opérationnel.
- 5- Redéfinir clairement les critères selon le type de complexité qu'on cherche à mesurer.

Pour les travaux à venir, notre expérience nous a dicté quelques recommandations :

- 1- Établir un background sur la modularité et la complexité à partir de la fin du présent projet. Ceci permettra d'identifier les lacunes des méthodes qui ont été présentées en les opposant d'autres travaux plus récents.
- 2- Tel qu'établi dans la littérature, les perceptions des concepts de modularité et complexité sont très relatives ainsi il serait important d'établir des définitions contextuelles et opérationnelles de la modularité et de la complexité pouvant conduire à l'harmonisation des critères dans le secteur industriel.
- 3- Améliorer les indicateurs de modularité et de complexité ou bien les formuler de nouveaux indicateurs structuraux, fonctionnels et dynamiques. La méthode de Poli serait une piste à explorer pour l'étude de la complexité, proposer un questionnaire structurer d'évaluation de la complexité afin de pouvoir dissocier la complexité statique de celle dynamique au sein de l'entreprise partenaire ensuite adapter la méthodologie aux résultats obtenus. En ce qui concerne la

modularité, revoir la pondération afin qu'il soit possible d'obtenir une modularité parfaite à 100% sinon proposer une méthode de calibration de l'indice de modularité. Restructurer la structure du processus d'assemblage en considérant que tout module d'assemblage de la ligne principale sont ramenés au même niveau puis évaluer l'indice de modularité.

- 4- Tester les méthodologies et assurer la validité interne et externe.
- 5- Développer un outil de calcul et de suivi dans le temps des indicateurs de modularité et de complexité.

ANNEXE I

RÉSUMÉ DE L'ARTICLE PRÉSENTÉ AU CONGRÈS DE LA CSME 2025

Info	Reviews
<p>A new perspective on measuring manufacturing modularity</p> <p>Pascale Alison Mekazi Mokué¹, Antoine Tahan¹, Lucas Hof¹</p> <p>¹École de Technologie Supérieure, Mechanical Engineering department, Canada</p> <p>View presentation</p>	
Event	CSME - CFDSC - CSR 2025
Submitted	February 12, 2025 - 17:29 · Pascale Alison Mekazi Mokué
Last modified	March 25, 2025 - 16:05
Edit Submission	✉ Contact
<p>Registration</p> <p>Pascale Alison Mekazi Mokué mekazialison2101@gmail.com</p> <p>View Registration</p>	
<p>Schedule</p> <p>Engineering Analysis & Design 2 May 26, 2025 - 17:00 EDT</p> <p>View Schedule</p>	

ANNEXE II

AFFICHE PRÉSENTÉ AU CONGRÈS DE L'ACFAS 2025

COMPLEXITÉ DE L'ASSEMBLAGE D'UN PRODUIT

Pascalle Alison Mekazi Mokué, Antoine Tahar, Lucas Hof
Département de Génie mécanique, École de technologie supérieure, Montréal

ÉTS
École de
technologie
supérieure
Université du Québec
Le génie pour l'industrie

1. Problématique

Pour mieux maîtriser les processus de conception et de production, les entreprises recherchent des modèles d'analyse capable d'identifier les zones où la complexité apparaît comme critique pour les performances.

Il existe plusieurs méthodes de mesure qui relèvent du domaine statique et dynamique de la complexité. Celle la plus célèbre est le modèle basé sur l'Entropie de Shannon.

On se demande au vu du caractère subjectif de la complexité s'il marche dans tous les cas. Cette étude vise à évaluer si les méthodes objectives de mesure de la complexité traduisent réellement les attentes subjectives des experts.

2. Méthodologie

La démarche de cette étude comprend à la base une recherche documentaire à travers la revue de la littérature, des travaux relatifs à la complexité déjà réalisés par le secteur industriel.

Ces mesures sont basées sur des lignes d'assemblage d'un produit réel. Grâce aux résultats obtenus, un classement est effectué de la ligne la plus complexe à la moins complexe qui est comparée à un autre en fonction de leur connaissance des lignes et des problèmes rencontrés.

Les rangs produits par les experts sont utilisés pour l'application des méthodes de statistiques descriptives. Le nuage de point a permis d'appréhender la dispersion des classements et la corrélation de Pearson.

3. Modèle et résultats

3.1. Proposition et limites des fonctions complexité

Complexité = $f(\text{temps, automatisation des opérations fasteners/pièces})$

Du point de vue de la ligne, les modèles de complexité s'écrivent:

Fonction sommative

$$\Sigma_i = [\log_2(\zeta_i) + \frac{\theta'_i}{\theta_i} \log_2(\theta_i) + \frac{\rho'_i}{\rho_i} \log_2(\rho_i) + \frac{\varphi'_i}{\varphi_i} \log_2(\varphi_i)]$$

Fonction multiplicative

$$\Pi_i = \sqrt[4]{\log_2(\zeta_i) \times \frac{\theta'_i}{\theta_i} \log_2(\theta_i) \times \frac{\rho'_i}{\rho_i} \log_2(\rho_i) \times \frac{\varphi'_i}{\varphi_i} \log_2(\varphi_i)}$$

4. Interprétation

La complexité statique est une fonction qui dépend du temps de cycle, du coefficient d'automatisation des opérations, du nombre de fasteners et/ou de pièces. On observe que ces fonctions de complexité indiquent que généralement les composants attendus n'épousent pas la perception de nos experts. Ceci pourrait se justifier d'une part par la non-dissection de la complexité statique celle dynamique par les experts à qui l'exercice de la classification des lignes a été soumis. Car ceux-ci sont très portés vers les phénomènes aléatoires difficiles à contrôler qui surviennent sur les lignes.

5. Bibliographie partielle

Cappou, M. (2023). *Complexité et fonctionnalité dans l'assemblage de la ligne de production*. Université de Montréal, Faculté des sciences industrielles et de l'ingénierie.

Vial, G. H., Coronado-Hernandez, J. R., & Nebles, A. C. P. (2022). Generalized Complexity Measures for Manufacturing Systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 41, 1007-1177.

Vial, G. H., Coronado-Hernandez, J. R., & Nebles, A. C. P. (2022). Generalized Complexity Measures for Manufacturing Systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 41, 1007-1177.

Proceedings of the International Conference on Sustainable Manufacturing (Vol. 1404, pp. 181-189). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4538-9_19

6. Remerciements

mitacs

Contact : pascalle.alison.mekazi.mokue.18@ens.etsmtl.ca
antoine.tahar.18@ens.etsmtl.ca

ANNEXE III

FEUILLE DE CALCUL DE L'INDICE DE MODULARITÉ : CAS D'ÉTUDE SIMPLES

	i	ki	ki'	si	si'	mi	alpha _i	pi	bi	qi	y	IMp	Rang experts	Rang IMp
	Niveau	Nbre intrants	Nbre intrants sub	Nbre modules	Nbre modules assemblage sub	Nbre connexions totales	2 ⁿⁱ	Poid niveau	si' + 1 / ki-1' + 1	Concentration intrants dans modules ass	Ratio MA sub / MA tot	Indice		
	Coef. corr.	0,973											28,43%	3 3
US-1	0	3	0	0	0	3	0	0,000	1	0,792	0,4			
US-1	1	3	2	1	0	4	2	0,067	1	0,792				
US-1	2	0	0	2	1	2	4	0,133	0,816	0,830				
US-1	3	1	0	1	0	2	8	0,267	1	0,792				
US-1	4	0	0	1	0	1	16	0,533	1	0,792				
US-1	5	0	0	0	0	0	0							
US-2	0	2	0	0	0	2	0	0,000	1	0,792	0,4	27,30%	4	5
US-2	1	4	2	1	0	5	2	0,067	1	0,792				
US-2	2	0	0	2	1	2	4	0,133	0,816	0,830				
US-2	3	1	0	1	0	2	8	0,267	1	0,792				
US-2	4	0	0	1	0	1	16	0,533	1	0,792				
US-2	5	0	0	0	0	0	0							
US-3	0	2	0	0	0	2	0	0,000	1	0,828	0,333333	23,39%	6	4
US-3	1	1	0	1	0	2	2	0,032	1	0,828				

Rang experts		Rang IMP											
i	ki	ki'	si	si'	mi	alpha _i	pi	bi	qi	y	Imp		
Niveau	Nbre intrants	Nbre intrants sub	Nbre modules assemblage	Nbre modules assemblage sub	Nbre connexions totales	2 ^{nj}	Poid niveau	si' + 1 / ki' - 1	Concentration intrants dans modules ass + 1	Ratio MA sub / MA tot	Indice		
US-3	2	3	2	1	0	4	4	0,065	1	0,828			
US-3	3	0	0	2	1	2	8	0,129	0,816	0,860			
US-3	4	1	0	1	0	2	16	0,258	1	0,828			
US-3	5	0	0	1	0	1	32	0,516	1	0,828			
US-3	6	0	0	0	0	0							
US-4	0	2	0	0	0	2	0	0,000	1	0,792	0,4	25,36%	5
US-4	1	1	0	1	0	2	2	0,067	1	0,792			
US-4	2	3	2	1	0	4	4	0,133	1	0,792			
US-4	3	1	0	2	1	3	8	0,267	0,8165	0,830			
US-4	4	0	0	1	0	1	16	0,533	1	0,792			
US-4	5	0	0	0	0	0							
US-5	0	2	0	0	0	2	0	0,000	1	0,857	0,166667	11,17%	11
US-5	1	1	0	1	0	2	2	0,016	1	0,857			
US-5	2	1	0	1	0	2	4	0,032	1	0,857			
US-5	3	1	0	1	0	2	8	0,063	1	0,857			
US-5	4	1	0	1	0	2	16	0,127	1	0,857			
US-5	5	1	0	1	0	2	32	0,254	1	0,857			
US-5	6	0	0	1	0	1	64	0,508	1	0,857			
US-5	7	0	0	0	0	0							
US-6	0	2	0	0	0	2	0	0,000	1	0,800			
US-6	1	2	0	1	0	3	2	0,067	1	0,800			

										Rang experts	Rang IMp
i	ki	ki'	si	si'	mi	alpha _i	pi	bi	qi	y	IMp
Niveau	Nbre intrants	Nbre intrants sub	Nbre modules assemblage	Nbre modules assemblage sub	Nbre modules assemblage totales	Nbre connexions	2 ^{λ_i}	Poid niveau	si'+1 / ki-1' +1	Concentration intrants dans modules ass	Ratio MA sub / MA tot
US-6	2	2	0	1	0	3	4	0,133	1	0,800	
US-6	3	1	0	1	0	2	8	0,267	1	0,800	
US-6	4	0	0	1	0	1	16	0,533	1	0,800	
US-6	5	0	0	0	0	0					
US-7	0	3	0	0	0	3	0	0,000	1	0,750	0,3333333
US-7	1	2	0	1	0	3	2	0,143	1	0,750	17,95%
US-7	2	2	0	1	0	3	4	0,286	1	0,750	
US-7	3	0	0	1	0	1	8	0,571	1	0,750	
US-7	4	0	0	0	0	0					
US-8	0	3	0	0	0	3	0	0,000	1	0,800	0,25
US-8	1	2	0	1	0	3	2	0,067	1	0,800	
US-8	2	1	0	1	0	2	4	0,133	1	0,800	
US-8	3	1	0	1	0	2	8	0,267	1	0,800	
US-8	4	0	0	1	0	1	16	0,533	1	0,800	
US-8	5	0	0	0	0	0					
US-9	0	3	0	0	0	3	0	0,000	1	0,750	
US-9	1	3	0	1	0	4	2	0,143	1	0,750	
US-9	2	1	0	1	0	2	4	0,286	1	0,750	
US-9	3	0	0	1	0	1	8	0,571	1	0,750	
US-9	4	0	0	0	0	0					

Rang experts										Rang IMP		
	i	ki	ki'	si	si'	mi	alpha _i	pi	bi	qi	y	IMP
Niveau	Nbre intrants	Nbre intrants sub	Nbre modules assemblage	Nbre modules assemblage sub	Nbre modules assemblage	Nbre connexions totales	2 ^{λ_i}	Poid niveau	si'+1 / ki-1'+1	Concentration intrants dans modules ass	Ratio MA sub / MA tot	Indice
US-10	0	6	4	0	0	6	0	0,000	1	0,640	0,75	62,01%
US-10	1	1	0	3	2	4	2	0,333	0,774	0,721		
US-10	2	0	0	1	0	1	4	0,667	1	0,640		
US-10	3	0	0	0	0	0						
US-11	0	7	5	0	0	7	0	0,000	1	0,631	0,75	75,00%
US-11	1	0	0	3	2	3	2	0,333	0,7071	0,739		
US-11	2	0	0	1	0	1	4	0,667	1	0,631		
US-11	3	0	0	0	0	0						

BIBLIOGRAPHIE

- Bashir, H. A., & Thomson, V. (1999). Estimating Design Complexity. *Journal of Engineering Design*, 10(3), 247-257. <https://doi.org/10.1080/095448299261317>
- Blackenfelt, M. (2001). Department of Machine Design Royal Institute of Technology S-100 44 Stockholm, Sweden.
- Bonjour, E. (2008). *Contributions à l'instrumentation du métier d'architecte système : de l'architecture modulaire du produit à l'organisation du système de conception..* thesis. Université de Franche-Comté. Repéré à <https://theses.hal.science/tel-00348034>
- Bonvoisin, J., Halstenberg, F., Buchert, T., & Stark, R. (2016). A systematic literature review on modular product design. *Journal of Engineering Design*, 27(7), 488-514. <https://doi.org/10.1080/09544828.2016.1166482>
- BRP. (2023). New Product Development.
- Capponi, M., Mastrogiacomo, L., & Franceschini, F. (2023a). General remarks on the entropy-inspired MCAT (manufacturing complexity assessment tool) model to assess product assembly complexity. *Production Engineering*, 17(6), 815-827. <https://doi.org/10.1007/s11740-023-01212-8>
- Capponi, M., Mastrogiacomo, L., & Franceschini, F. (2023b). General remarks on the entropy-inspired MCAT (manufacturing complexity assessment tool) model to assess product assembly complexity. *Production Engineering*, 17(6), 815-827. <https://doi.org/10.1007/s11740-023-01212-8>
- Carpenter, J. 'JR'. (2024). Product Modularity: Literature Since 2016. Dans *2024 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)* (pp. 1-4). <https://doi.org/10.23919/PICMET64035.2024.10653154>
- Chatras, C., & Giard, V. (2015). Standardisation, commonalité, modularité.
- Chryssolouris, G., Efthymiou, K., Papakostas, N., Mourtzis, D., & Pagoropoulos, A. (2013a). Flexibility and Complexity: is it a trade off. *International Journal of Production Research*, 51. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.761362>
- Chryssolouris, G., Efthymiou, K., Papakostas, N., Mourtzis, D., & Pagoropoulos, A. (2013b). Flexibility and complexity: is it a trade-off? *International Journal of Production Research*, 51(23-24), 6788-6802. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.761362>
- Crespo-Varela, J. R., Okudan Kremer, G. E., Tucker, C. S., & Medina, L. A. (2012). An Analysis of Complexity Measures for Product Design and Development. Dans *Volume 3: 38th Design Automation Conference, Parts A and B* (pp. 523-532). Chicago, Illinois,

USA : American Society of Mechanical Engineers.
<https://doi.org/10.1115/DETC2012-71309>

Duray, R., Ward, P. T., Milligan, G. W., & Berry, W. L. (2000). Approaches to mass customization: configurations and empirical validation. *Journal of Operations Management*, 18(6), 605-625. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(00\)00043-7](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(00)00043-7)

Efatmaneshnik, M., Shoval, S., & Qiao, L. (2018). A Standard Description of the Terms Module and Modularity for Systems Engineering. *IEEE Transactions on Engineering Management*, PP, 1-11. <https://doi.org/10.1109/TEM.2018.2878589>

Efthymiou, K., Mourtzis ,D., Pagoropoulos ,A., Papakostas ,N., & and Chryssolouris, G. (2016). Manufacturing systems complexity analysis methods review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(9), 1025-1044. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1130245>

Efthymiou, K., Mourtzis, D., Pagoropoulos, A., Papakostas, N., & Chryssolouris, G. (2016). Manufacturing systems complexity analysis methods review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(9), 1025-1044. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1130245>

ElMaraghy, H., AlGedawy, T., Samy, S. N., & Espinoza, V. (2014a). A model for assessing the layout structural complexity of manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(1), 51-64. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.05.012>

ElMaraghy, H., AlGedawy, T., Samy, S. N., & Espinoza, V. (2014b). A model for assessing the layout structural complexity of manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(1), 51-64. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.05.012>

ElMaraghy, W., ElMaraghy, H., Tomiyama, T., & Monostori, L. (2012). Complexity in engineering design and manufacturing. *CIRP Annals*, 61(2), 793-814. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.001>

Fotso, B. E. M. (2006). *Contribution à une méthodologie de conception modulaire: modélisation de la diversité dans les familles de produits*. Université de Franche-Comté, France. Repéré à HAL. (tel-00241342)

Frigant, V., & Jullien, B. (2014). Comment la production modulaire transforme l'industrie automobile. *Revue d'économie industrielle*, (145), 11-44. <https://doi.org/10.4000/rei.5721>

Gupta, P. (2019). Modularity enablers: a tool for Industry 4.0. *Life Cycle Reliability and Safety Engineering*, 8(2), 157-163. <https://doi.org/10.1007/s41872-018-0067-3>

Herrera Vidal, G., & Coronado Hernández, J. R. (2021a). Complexity in manufacturing systems: a literature review. *Production Engineering*, 15(3-4), 321-333. <https://doi.org/10.1007/s11740-020-01013-3>

- Herrera Vidal, G., & Coronado Hernández, J. R. (2021b). Complexity in manufacturing systems: a literature review. *Production Engineering*, 15(3-4), 321-333. <https://doi.org/10.1007/s11740-020-01013-3>
- Joergensen, S. N., Schou, C., & Madsen, O. (2014). Developing Modular Manufacturing Architectures – An Industrial Case Report. Dans M. F. Zaeh (Éd.), *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability* (pp. 55-60). Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02054-9_10
- Keating, M. (2000). Measuring design quality by measuring design complexity. Dans *Proceedings IEEE 2000 First International Symposium on Quality Electronic Design (Cat. No. PR00525)* (pp. 103-108). <https://doi.org/10.1109/ISQED.2000.838861>
- Kerbrat, O. (2009). *Méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides basée sur l'évaluation quantitative de la complexité de fabrication*. phdthesis. Ecole Centrale de Nantes (ECN). Repéré à <https://theses.hal.science/tel-00439589>
- Kubota, F. I., Cauchick-Miguel, P. A., Hsuan, J., & Lacerda, D. P. (2022a). Modularity in design and production relationships: a field study in two automakers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(5), 1589-1606. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10262-8>
- Kubota, F. I., Cauchick-Miguel, P. A., Hsuan, J., & Lacerda, D. P. (2022b). Modularity in design and production relationships: a field study in two automakers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(5-6), 1589-1606. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10262-8>
- Mattsson, S., Gullander, P., & Davidsson, A. (2011). Method for Measuring Production Complexity.
- Modrak, V., & Soltysova, Z. (2023a). Assessment of Product Variety Complexity. *Entropy*, 25(1), 119. <https://doi.org/10.3390/e25010119>
- Modrak, V., & Soltysova, Z. (2023b). Influence of Manufacturing Process Modularity on Lead Time Performances and Complexity. *Applied Sciences*, 13(12), 7196. <https://doi.org/10.3390/app13127196>
- Mourtzis, D., Fotia, S., & Boli, N. (2017). Metrics definition for the product-service system complexity within mass customization and industry 4.0 environment. Dans *2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)* (pp. 1166-1172). Funchal : IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICE.2017.8280013>
- Mourtzis, D., Fotia, S., Boli, N., & Pittaro, P. (2018). Product-service system (PSS) complexity metrics within mass customization and Industry 4.0 environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(1-4), 91-103. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1903-3>

Oh, K., Kim, D., & Hong, Y. S. (2015a). Measurement of Assembly System Complexity Based on the Task Differences Induced From Product Variety. Dans *Volume 2B: 41st Design Automation Conference* (p. V02BT03A040). Boston, Massachusetts, USA : American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/DETC2015-47129>

Oh, K., Kim, D., & Hong, Y. S. (2015b). Measurement of Assembly System Complexity Based on the Task Differences Induced From Product Variety. Dans *Volume 2B: 41st Design Automation Conference* (p. V02BT03A040). Boston, Massachusetts, USA : American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/DETC2015-47129>

Pandremenos, J., Paralikas, J., Salonitis, K., & Chryssolouris, G. (2009). Modularity concepts for the automotive industry: A critical review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1(3), 148-152. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2008.09.012>

Ressources humaines. (2023). Présentation de BRP.

Roy, M.-A., & Abdul-Nour, G. (2024). Mass Personalization in SME – Key Concepts of a Modular Strategy.

Samy, S. N., & ElMaraghy, H. (2010). A model for measuring products assembly complexity. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23(11), 1015-1027. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2010.511652>

Shaik, A. M., Rao, V. V. S. K., & Rao, Ch. S. (2015). Development of modular manufacturing systems—a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(5), 789-802. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6289-2>

Shoval, S., & Efatmaneshnik, M. (2019). Managing complexity of assembly with modularity: a cost and benefit analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(9), 3815-3828. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03802-2>

Soltysova, Z., & Modrak, V. (2021a). Optimality of Modular Design of Assembly Process Networks in Terms of Mass Customization. Dans *2021 6th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM)* (pp. 1-6). Preveza, Greece : IEEE. <https://doi.org/10.1109/SEEDA-CECNSM53056.2021.9566275>

Soltysova, Z., & Modrak, V. (2021b). Optimality of Modular Design of Assembly Process Networks in Terms of Mass Customization. Dans *2021 6th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM)* (pp. 1-6). <https://doi.org/10.1109/SEEDA-CECNSM53056.2021.9566275>

- Sorensen, D. G. H., Brunoe, T. D., & Nielsen, K. (2018). Challenges in Production and Manufacturing Systems Platform Development for Changeable Manufacturing. Dans I. Moon, G. M. Lee, J. Park, D. Kiritsis, & G. von Cieminski (Éds), *Advances in Production Management Systems. Production Management for Data-Driven, Intelligent, Collaborative, and Sustainable Manufacturing* (pp. 312-319). Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99704-9_38
- Tamaskar, S., Neema, K., & DeLaurentis, D. (2014). Framework for measuring complexity of aerospace systems. *Research in Engineering Design*, 25(2), 125-137. <https://doi.org/10.1007/s00163-014-0169-5>
- Trattner, A., Hvam, L., Forza, C., & Herbert-Hansen, Z. N. L. (2019). Product complexity and operational performance: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 25, 69-83. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2019.02.001>
- Vidal, Germán Herrera, Coronado-Hernández, J. R., & Minnaard, C. (2023). Measuring manufacturing system complexity: a literature review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 34(7), 2865-2888. <https://doi.org/10.1007/s10845-022-01974-5>
- Vidal, Germán Herrera, Coronado-Hernández, J. R., & Niebles, A. C. P. (2022). Conceptual Model for Measuring Complexity in Manufacturing Systems. Dans R. C. Poonia, V. Singh, D. Singh Jat, M. J. Diván, & M. S. Khan (Éds), *Proceedings of Third International Conference on Sustainable Computing* (Vol. 1404, pp. 181-189). Singapore : Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4538-9_19
- Vidal, Germán Herrera, Hernández, J. R. C., & Minnaard, C. (2022). Modeling and statistical analysis of complexity in manufacturing systems under flow shop and hybrid environments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(9), 3049-3058. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08028-9>
- Vidal, Germán Herrera, Hernández, J. R. C., & Minnaard, C. (2023). A new perspective on measuring entropic complexity in manufacturing systems. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01462-x>
- Vidal, G.H., Coronado-Hernandez, J. R., & Niebles, A. C. P. (2022). Conceptual Model for Measuring Complexity in Manufacturing Systems. Dans *Third International Conference on Sustainable Computing: SUSCOM 2021, 19-20 March 2021* (pp. 181-9). Berlin, Germany : Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4538-9_19
- Wang, Y., Ma, H.-S., Yang, J.-H., & Wang, K.-S. (2017). Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production. *Advances in Manufacturing*, 5(4), 311-320. <https://doi.org/10.1007/s40436-017-0204-7>

- Zeltzer, L., Limère, V., Van Landeghem, H., Aghezzaf, E.-H., & Stahre, J. (2013). Measuring complexity in mixed-model assembly workstations. *International Journal of Production Research*, 51(15), 4630-4643.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2013.783246>