



**HAL**  
open science

# Évaluation de la performance du processus de conception liée à l'utilisation d'outils d'ingénierie basés sur les connaissances et à la capitalisation des connaissances

Sébastien Barlet-Bas

## ► To cite this version:

Sébastien Barlet-Bas. Évaluation de la performance du processus de conception liée à l'utilisation d'outils d'ingénierie basés sur les connaissances et à la capitalisation des connaissances. Génie mécanique [physics.class-ph]. École Nationale Supérieure des Arts et Métiers, 2024. Français. <NNT : 2024ENAME054>. <tel-04995982>

**HAL Id: tel-04995982**

**<https://pastel.hal.science/tel-04995982v1>**

Submitted on 18 Mar 2025

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

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



HAL Authorization

**ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**  
**Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Physiques Et Numériques (LISPEN)**  
**Campus d'Aix-en-Provence**

# THÈSE

*Présentée par :* **Sébastien BARLET-BAS**

*Soutenue le :* **5 décembre 2024**

*pour obtenir le diplôme de* **Doctorat** *délivré par :*

**L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

*Spécialité :* **Conception**

## **Évaluation de la performance du processus de conception liée à l'utilisation d'outils d'ingénierie basés sur les connaissances et à la capitalisation des connaissances**

**THÈSE dirigée par :**  
**M. Lionel ROUCOULES**

**et co-encadrée par :**  
**M. François MALBURET**

**M. Benoît EYNARD**  
**Mme. Olivia PENAS**  
**M. Frédéric DEMOLY**  
**M. Lionel ROUCOULES**  
**M. François MALBURET**  
**M. Cédric LOPEZ**  
**M. Bruno PIERREL**

Enseignant-Chercheur Contractuel HDR, Roberval, UTC  
Ingénieure de Recherche HDR, Quartz, ISAE-Supméca  
Professeur des Universités, ICB-COMM, UTBM  
Professeur des Universités, LISPEN, ENSAM Aix-en-Provence  
Maître de Conférences, LISPEN, ENSAM Aix-en-Provence  
Directeur Ingénierie & Innovation, Docteur, NEXTEAM GROUP  
Resp. Recherche & Innovation, Ingénieur, NEXTEAM GROUP

**Jury**  
Président  
Rapporteuse  
Rapporteur  
Directeur de thèse  
Co-encadrant  
Examineur  
Invité

**T  
H  
È  
S  
E**



# Remerciements

En premier lieu, je souhaite remercier M. Cédric LOPEZ, directeur Ingénierie & Innovation de Nexteam Group, de m'avoir offert l'opportunité de compléter ma formation d'ingénieur à travers ces travaux de doctorat au sein de l'entreprise Nexteam Group, qui plus est dans de bonnes conditions. Merci également d'avoir renouvelé la confiance placée en moi pour poursuivre l'aventure chez Nexteam Group. Un remerciement particulier également à M. Bruno PIERREL, responsable Recherche & Innovation et encadrant non-officiel mais toujours présent et attentif aux détails durant ces trois années.

Mes remerciements vont ensuite à l'attention de M. Lionel ROUCOULES, Professeur des Universités du laboratoire LISPEN de l'ENSAM d'Aix-en-Provence, pour la direction de cette thèse, ainsi qu'à M. François MALBURET, Maître de Conférences du laboratoire LISPEN de l'ENSAM d'Aix-en-Provence, pour sa co-direction. Leurs expériences et leurs conseils ont permis de diriger au mieux ces travaux de recherche. Merci également pour votre disponibilité et votre attention dans la relecture des rapports et publications.

Je veux également remercier l'ensemble des membres du jury, donc merci à M. Benoît EYNARD, Enseignant-Chercheur contractuel à l'unité Roberval de l'UTC, d'avoir accepté de présider ce jury ; merci à Mme. Olivia PENAS et M. Frédéric DEMOLY, respectivement Ingénieure de Recherche au laboratoire Quartz d'ISAE-Supméca et Professeur des Universités à l'ICB-COMM de l'UTBM, d'avoir accepté de rapporter ces travaux de thèse. Merci renouvelé à M. Benoît EYNARD, et également à M. Jérôme PAILHES, Professeur des Université au laboratoire I2M de l'ENSAM Bordeaux, d'avoir examiné et critiqué - dans le bon sens du terme - mes travaux de thèse durant ces trois ans de formation à travers le CSID (Comité de Suivi Individuel Doctoral).

Je remercie les institutions qui ont accepté de financer ces travaux de recherche, pour les rendre possibles, dans le cadre d'une convention CIFRE (Convention Industrielle de Formation de REcherche), donc l'ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) ainsi que l'entreprise MGP-Asquini (devenue depuis Nexteam Marmande Machining, filiale de Nexteam Group) d'avoir accepté de financer ces travaux de thèse.

## REMERCIEMENTS

---

Un grand merci à toutes les personnes que j'ai eu la chance de côtoyer sur les différents sites de Nexteam Group, je garderai en mémoire les échanges enrichissants et les bons moments passés en votre compagnie. Donc, et j'espère n'oublier personne, merci à Axel, Alexandre, Ludovic, Joseph et Julie pour ceux que j'ai croisé sur le site de Marignane, et merci à Stéphane, Stephan, Tom, Cloé, Steve, Victor, Laurent, Vincent, Florestan, Bertrand et enfin à Marc pour les sites de Launaguet. Une pensée également pour Florent, qui a toujours su prendre du temps pour former l'ingénieur en devenir que j'étais.

Merci à Ludivine CARGNINO pour l'accompagnement administratif ainsi qu'à Émilie VERONE pour le support pour les parties littéraire et bibliographiques. Je remercie également tous les doctorants que j'ai eu la chance de rencontrer au sein du LISPEN, en particulier Lucas, Rima et Rabab. Merci Lucas pour le soutien depuis le master recherche durant les confinements, et pour ce que tu fais pour la communauté des doctorants à travers SMART, accompagné de Rima. Merci à Rima et Rabab pour tous ces moments de doute partagés, courage à toutes les deux, c'est la dernière ligne droite! Bon courage également à Paul, Gabriel et tous les autres doctorants qui ont pris la relève.

Pour compléter ces remerciements, je souhaite dire merci à mes plus proches amis pour leur présence lors de ces trois dernières années. Merci à Bertrand, Julien et Peter pour votre soutien constant, pour tous les bons moments passés et à venir. Merci également à Arthur, ainsi qu'à tous ceux rencontrés en CPGE à Jean Dupuy - élèves comme professeurs. Quelque part, c'était le point de départ de cette aventure. Une pensée également pour les copains du *Bicar'ssssss*, pour tous les beaux souvenirs au *tabagn's de Bordel's* et pour tous ceux à venir.

Enfin, je souhaite ponctuer ces remerciements avec quelques mots pour mes parents, qui m'ont toujours apporté un soutien et une confiance sans faille. Je me rends compte de la chance que j'ai eu dans l'éducation et le cadre de vie que j'ai reçu pour m'épanouir. Merci également à mes « petits » frères pour leur présence. Pour terminer, le mot de la fin t'est destiné, Caroline. Merci du temps que tu as pris pour m'aider lorsque j'en avais besoin, merci pour ton soutien et ton amour qui m'ont permis de surpasser les moments les plus difficiles de cette thèse.

## REMERCIEMENTS

---

## REMERCIEMENTS

---

# Résumé

Ces travaux de thèse s'intègrent dans un contexte de développement produit au sein de l'industrie aéronautique. Pour maintenir ou accroître leur compétitivité, les entreprises cherchent à valoriser les connaissances à leur disposition dans l'objectif d'accélérer les phases de conception et de diminuer les coûts de développement. Les systèmes d'ingénierie basés sur la connaissance (KBE) sont étudiés dans la littérature depuis plusieurs décennies et promettent des gains de temps, l'automatisation de tâches répétitives et à faible valeur ajoutée ou encore l'optimisation de la conception. Cependant, ces gains ne sont pas démontrés dans un environnement industriel en raison des difficultés à intégrer ces outils dans ces environnements complexes. Les approches KBE reposent sur la capitalisation des connaissances, dont l'enjeu est de parvenir à les structurer, de façon à construire une base de connaissances propres à l'industriel qu'il peut valoriser en tant que ressource au service des futures conceptions. De plus, il n'existe actuellement pas de méthode explicite pour implémenter ce type de solution dans un processus de développement produit (PDP). Les problématiques concernent donc d'une part l'identification et l'implémentation des outils KBE adaptés dans un environnement industriel, mais aussi l'évaluation de la performance apportée par ces outils d'autre part. Ces travaux se sont orientés vers la définition d'un méta-modèle de capitalisation processus pour structurer les connaissances durant le PDP et pouvant s'intégrer dans un outil KBE. Le deuxième axe est porté sur la construction d'un système de mesure pour quantifier les gains de performance qu'apportent le développement et l'utilisation d'outils KBE à l'échelle du PDP. Ces propositions sont illustrées sur le cas industriel de développement de lignes de transmission mécanique, composées d'arbres de transmission en composite, au moyen d'une application métier KBE, nommée KANO, qui a été développée à cette fin.

**Mots-clés :** Ingénierie basée sur les connaissances, Processus de conception, Capitalisation des connaissances, Méta-modèle de capitalisation, Traçabilité des processus, Évaluation de la performance, Aide à la conception, Modélisation des processus

## RESUME

---

# Abstract

This thesis is being conducted in the context of product development in the aeronautics industry. To maintain or increase their competitiveness, companies are seeking to leverage the knowledge at their disposal, with the aim of accelerating design phases and reducing development costs. Knowledge-based engineering (KBE) systems have been studied in the literature for several decades, and promise to save time, automate repetitive and low-value-added tasks and optimize design. However, these gains have not been demonstrated in an industrial environment, due to the difficulties of integrating these tools into complex environments. KBE approaches are based on the capitalization of knowledge, the challenge being to structure it in such a way as to build a knowledge base specific to the industrial company, which it can use as a resource for future designs. What's more, there is currently no generic approach or tools for implementing this type of solution in a product development process (PDP). The problems therefore concern, on the one hand, the identification and implementation of generic tools for implementing KBE tools in an industrial environment, and on the other hand, the evaluation of the performance provided by these tools. This work focused on the definition of a process capitalization meta-model for structuring knowledge during the PDP, which could be integrated into a KBE tool. The second focus is on the construction of a measurement system to quantify the performance gains achieved by the development and use of KBE tools at PDP level. These proposals are illustrated on the industrial case of the development of mechanical transmission lines, made up of composite drive shafts, using a KBE business application, named KANO, which has been developed for this purpose.

**Keywords :** Knowledge-based engineering, Design process, Knowledge capitalization, Capitalization meta-model, Process traceability, Performance evaluation, Design support, Process modeling

ABSTRACT

---

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>iii</b>
<b>Résumé</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Table des matières</b>	<b>xiii</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>xvii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xx</b>
<b>Acronymes</b>	<b>xxi</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Contexte industriel et problématique</b>	<b>7</b>
1.1 Contexte des travaux de recherche . . . . .	9
1.2 Notion de performance de développement . . . . .	13
1.3 Processus de développement de produits . . . . .	16
1.3.1 Définition du processus de développement . . . . .	16
1.3.2 Présentation des processus de développement de produits . . . . .	18
1.3.3 Caractéristiques du processus de conception du secteur aéronautique . . . . .	23
1.4 Identification du processus initial pour l'application de la proposition . . . . .	27
1.4.1 Le processus de développement de produits de Nexteam Group . . . . .	27
1.4.2 Le processus de prédimensionnement de Nexteam Group . . . . .	31
1.5 Les activités de conception de Nexteam Group . . . . .	35
1.5.1 Le calcul des contraintes de torsion . . . . .	38
1.5.2 Le calcul des fréquences . . . . .	40

TABLE DES MATIÈRES

---

1.5.3	Autres activités de conception . . . . .	41
1.6	Validation des recherches en sciences de la conception . . . . .	43
1.7	Conclusion et problématique . . . . .	47
<b>2</b>	<b>État de l'art</b>	<b>49</b>
2.1	La capitalisation des connaissances métier . . . . .	52
2.1.1	Les objectifs de la capitalisation des connaissances métier . . . . .	52
2.1.2	La gestion de la connaissance . . . . .	53
2.1.3	La construction des connaissances . . . . .	55
2.1.4	Les méta-modèles de capitalisation . . . . .	57
2.2	L'ingénierie basée sur la connaissance . . . . .	63
2.2.1	Définition et approche . . . . .	63
2.2.2	Limites et performances des approches KBE . . . . .	66
2.3	Mesure de la performance développée . . . . .	75
2.3.1	Indicateurs de performance des activités métier . . . . .	77
2.3.2	Indicateurs de performance des outils métier . . . . .	83
2.3.3	Indicateurs de performance du processus de capitalisation des connaissances . . . . .	88
2.4	Synthèse de l'état de l'art . . . . .	93
<b>3</b>	<b>Proposition : méthode d'implémentation de système KBE et mesure de la performance développée associée</b>	<b>97</b>
3.1	Définition du système KBE . . . . .	100
3.2	Méta-modèle de capitalisation des connaissances . . . . .	105
3.3	Définition du système de mesure de la performance développée . . . . .	109
3.3.1	Mesure de la complexité des outils métier . . . . .	110
3.3.2	Mesure de la performance des activités et du processus . . . . .	115
3.3.3	Mesure de la performance de la capitalisation des connaissances . . . . .	120
3.4	Bilan de la proposition . . . . .	125
<b>4</b>	<b>Implémentation et validation de la proposition scientifique</b>	<b>127</b>
4.1	Implémentation de l'application KANO . . . . .	129
4.1.1	Présentation générale . . . . .	129
4.1.2	Modélisation de la base de connaissances . . . . .	131
4.1.3	Activité KBE pour le calcul des contraintes en torsion d'un arbre composite . . . . .	133
4.1.4	Activité KBE pour le calcul modes propres d'une ligne de transmission de puissance . . . . .	135
4.1.5	Activité KBE pour la manipulation de la base de connaissances . . . . .	138

## TABLE DES MATIÈRES

---

4.2	Définition du protocole de validation . . . . .	140
4.2.1	Les outils de conception . . . . .	143
4.2.2	Définition du cahier des charges . . . . .	144
4.2.3	Données à mesurer . . . . .	148
4.2.4	Relevé des mesures et questionnaire . . . . .	150
4.3	Mise en œuvre sur les activités de conception . . . . .	153
4.3.1	Mesure et estimation de la performance de la capitalisation . . . . .	153
4.3.2	Mesure de la performance des activités du processus métier de prédimensionnement	156
4.3.3	Extension des résultats à l'échelle du processus de prédimensionnement . . . . .	161
4.3.4	Mesure du ROI et de la complexité d'intégration dans le processus métier des outils KBE . . . . .	166
4.3.5	Estimation du ROI du processus de capitalisation . . . . .	170
4.3.6	Conclusion sur le système de mesure de la performance . . . . .	172
4.4	Conclusion de l'application . . . . .	174
	<b>Conclusion</b>	<b>177</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>183</b>
	<b>A Benchmark de méta-modèles</b>	<b>201</b>
	<b>B Systèmes de mesure de la performance de la gestion des connaissances</b>	<b>203</b>
	<b>C Application KANO</b>	<b>207</b>

## TABLE DES MATIÈRES

---

# Table des figures

1	Méta-modèle d’instanciation d’un socle commun pour la validation d’une proposition fondamentale pour un objet d’étude donné . . . . .	4
1.1	Définition du processus de développement de produits à travers les interactions entre le processus métier et le processus de capitalisation des connaissances . . . . .	11
1.2	Identification des enjeux et objectifs de ces travaux autour du processus de développement de produits . . . . .	12
1.3	Efficacité et efficience d’une activité, représentation selon IDEF0 . . . . .	15
1.4	Processus de la conception complète . . . . .	18
1.5	Activités de conception dans un processus de conception complète . . . . .	20
1.6	Approche systématique de Pahl et Beitz . . . . .	21
1.7	Composition des quatre domaines relatifs à la conception . . . . .	22
1.8	Principe d’un processus de conception avec portes de contrôle . . . . .	23
1.9	Structure de l’ingénierie système et des vérifications . . . . .	24
1.10	Vue d’ensemble du processus de développement de produits incluant les phases, les revues ainsi que les tâches attendues . . . . .	26
1.11	Processus de conception aéronautique standard utilisé pour les développements de produits chez Nexteam Group . . . . .	29
1.12	Processus métier de développement de produits chez Nexteam Group en vue macroscopique . . . . .	31
1.13	Représentation IDEF0 du sous-processus de prédimensionnement initial chez Nexteam Group . . . . .	33
1.14	Exemple d’architecture de transmission arrière d’hélicoptère SIKORSKY S-92A . . . . .	35
1.15	Exemples de composants d’une transmission arrière d’hélicoptère . . . . .	36
1.16	Analyse fonctionnelle d’un arbre de transmission . . . . .	37
1.17	Exemple de la modélisation et du calcul des contraintes en torsion d’un arbre composite . . . . .	39
1.18	Exemple du calcul des modes propres d’une ligne de transmission . . . . .	41
1.19	Structure du DRM . . . . .	44
1.20	Méta-modèle de benchmark à l’issue du chapitre 1 . . . . .	48

## TABLE DES FIGURES

---

2.1	Présentation de la structure de l'état de l'art basée sur l'analyse du processus de développement de produits . . . . .	51
2.2	Spirale de la création de connaissance . . . . .	55
2.3	Cycle de la gestion des connaissances . . . . .	56
2.4	Représentation de la norme MOF . . . . .	58
2.5	Cas d'utilisation du méta-modèle au sein du processus basé sur les objectifs définis au début de la section . . . . .	59
2.6	Méta-modèle de processus proposé par Es Soufi . . . . .	60
2.7	Exemples de cas de figure pour lesquels le méta-modèle proposé est un moyen de capitalisation pertinent . . . . .	62
2.8	Structure de la section sur l'analyse des indicateurs du PDP . . . . .	76
2.9	Mesure de la performance d'un processus de conception . . . . .	80
2.10	Mesure de la performance des activités pour remonter à une performance du processus . . . . .	81
2.11	Synthèse des KPI pour les activités métier . . . . .	83
2.12	Précision et biais d'un modèle . . . . .	86
2.13	Synthèse des KPI pour les outils métier . . . . .	88
2.14	Synthèse des KPI pour les activités de capitalisation . . . . .	92
2.15	Synthèse des indicateurs à conserver et à adapter dans la proposition de système de mesure . . . . .	94
2.16	Méta-modèle de benchmark à l'issue du chapitre 2 . . . . .	95
3.1	Présentation de l'organisation du chapitre 3 basée sur la structure du PDP visée à l'issue de la proposition . . . . .	99
3.2	Proposition de structure des processus métier et de capitalisation ainsi que le lien entre eux à travers une méthode KBE . . . . .	100
3.3	Proposition mise à jour avec le détail de la structure du système KBE comme ressource du processus métier . . . . .	102
3.4	Proposition de méta-modèle de processus . . . . .	105
3.5	Synthèse des indicateurs utilisés dans le système de mesure proposé pour évaluer les gains de performance apportés par le KBS . . . . .	109
3.6	Identification des zones d'intérêt pour développer des outils en fonction de la fréquence prévisionnelle d'utilisation . . . . .	115
3.7	Mesure de l'efficacité et de l'efficience d'un processus . . . . .	117
3.8	Méta-modèle de benchmark à l'issue du chapitre 3 . . . . .	126
4.1	Diagramme de classe de l'application KANO . . . . .	131
4.2	Structure de la base de données du logiciel KANO . . . . .	132
4.3	Représentation de la classe utilisée pour le calcul des contraintes d'un arbre de transmission . . . . .	133

## TABLE DES FIGURES

---

4.4	Processus détaillé du calcul des contraintes de torsion d'un arbre composite . . . . .	134
4.5	Exemple de différentes configurations d'arbres de transmission en composite générées par les outils métier intégrés au logiciel KANO . . . . .	134
4.6	Processus détaillé du calcul des fréquences d'une ligne de transmission . . . . .	136
4.7	Représentation des classes utilisées pour le calcul des fréquences d'une ligne de transmission . . . . .	137
4.8	Exemple d'une chaîne de transmission . . . . .	137
4.9	Processus de prédimensionnement utilisé pour la validation expérimentale avec en noir le processus <i>as-is</i> et en rouge les différences apportées par le processus <i>to-be</i> . . . . .	140
4.10	Illustration de l'architecture utilisée pour les expérimentations de validation de la proposition scientifique . . . . .	146
4.11	Schéma de l'architecture utilisée pour les expérimentations de validation de la proposition scientifique . . . . .	147
4.12	Données à relever lors des activités pour la construction des KPI . . . . .	149
4.13	Données à relever lors des processus pour la construction des KPI . . . . .	150
4.14	Présentation de la structure de la section et des différents indicateurs étudiés . . . . .	153
4.15	Méta-modèle de benchmark à l'issue du chapitre 4 . . . . .	175
A.1	Comparaison de différents méta-modèles sur les critères de gestion des données produit et sur les liaisons produit aux processus . . . . .	201
A.2	Comparaison de différents méta-modèles . . . . .	202
B.1	Origine des modèles de simulation et de leur complexité . . . . .	203
B.2	Exemple de système d'évaluation de la performance de la gestion des connaissances . . . . .	204
B.3	Exemple de matrice des indicateurs de performance . . . . .	205
C.1	Capture d'écran de l'application KANO - Page d'accueil . . . . .	207
C.2	Capture d'écran de l'application KANO - Données de contexte . . . . .	208
C.3	Capture d'écran de l'application KANO - Calcul des contraintes de torsion - définition des paramètres de l'arbre . . . . .	209
C.4	Capture d'écran de l'application KANO - Calcul des contraintes de torsion - résultats . . . . .	210
C.5	Capture d'écran de l'application KANO - Calcul des fréquences - définition de la ligne de transmission . . . . .	211
C.6	Capture d'écran de l'application KANO - Calcul des fréquences - résultats . . . . .	212
C.7	Capture d'écran de l'application KANO - Accès à la base de données . . . . .	213
C.8	Capture d'écran de l'application KANO - Requête à la base de données . . . . .	214

TABLE DES FIGURES

---

# Liste des tableaux

1.1	Définitions de la performance (extrait de Cedergren et complété) . . . . .	14
1.2	Différentes définitions du processus de développement de produits . . . . .	16
1.3	Synthèse des principales revues de développement de système . . . . .	25
2.1	Différentes définitions du KBE . . . . .	63
2.2	Différentes implémentations KBE dans la littérature . . . . .	70
2.3	Indicateurs de performance du processus de développement de produits . . . . .	78
2.4	Indicateurs de performance des activités métier . . . . .	82
2.5	Indicateurs de performance des outils utilisés dans les activités métier . . . . .	85
2.6	Indicateurs pour la capitalisation et la gestion des connaissances . . . . .	90
3.1	Positionnement des niveaux de chaque critère de complexité d'intégration d'un outil . . . . .	112
3.2	Echelle d'évaluation de la complexité d'intégration d'un outil dans le processus . . . . .	112
3.3	Comparaison de trois outils génériques d'une activité de conception . . . . .	113
3.4	Données à capitaliser lors des activités pour constituer la base des connaissances . . . . .	123
3.5	Échelle d'évaluation du niveau de capitalisation de chaque composant QQQCOP du contexte . . . . .	124
4.1	Identification des premières activités du PDP pour la mise en œuvre expérimentale de la proposition . . . . .	141
4.2	Identification des activités du PDP pour estimer les valeurs des indicateurs . . . . .	142
4.3	Objectifs des activités du sous-processus de prédimensionnement . . . . .	142
4.4	Présentation des concepteurs pour la réalisation des essais . . . . .	143
4.5	Cahier des charges pour le prédimensionnement d'un arbre composite . . . . .	145
4.6	Paramètres des différents composants de la ligne de transmission utilisée pour valider la proposition scientifique . . . . .	147
4.7	Quantification de la richesse de la capitalisation des composantes du QQQCOP par activité du processus de prédimensionnement . . . . .	154
4.8	Calcul des taux de capitalisation par activité du processus de prédimensionnement . . . . .	155

LISTE DES TABLEAUX

---

4.9	Résultats de l'expérimentation pour les mesures de temps du prédimensionnement en fréquences de l'arbre de transmission composite, exprimées en minutes . . . . .	157
4.10	Quantification du gain d'efficience apporté par le processus <i>to-be</i> pour l'étude du positionnement fréquentiel . . . . .	159
4.11	Résultats de l'expérimentation pour les mesures de temps du prédimensionnement en contraintes de l'arbre de transmission composite, exprimées en minutes . . . . .	159
4.12	Quantification du gain d'efficience apporté par le processus <i>to-be</i> pour l'étude des contraintes de torsion . . . . .	160
4.13	Estimation du nombre d'activités à réaliser pour un processus de prédimensionnement complet . . . . .	162
4.14	Estimation des durées des activités pour un processus de prédimensionnement complet, exprimées en minutes . . . . .	163
4.15	Estimation du gain d'efficience pour chaque étape du processus et pour le processus de prédimensionnement complet . . . . .	164
4.16	Analyse du ROI de l'automatisation de l'activité de génération de modèle pour le prédimensionnement en fréquences d'une ligne de transmission . . . . .	167
4.17	Comparaison de la complexité d'intégration entre les outils actuels et l'outil KBE développé pour le calcul des fréquences . . . . .	168
4.18	Analyse du ROI de l'automatisation de l'activité de génération de modèle pour le prédimensionnement en contraintes de torsion d'un arbre de transmission composite . . . . .	169
4.19	Comparaison de la complexité d'intégration entre l'outil actuel et l'outil KBE développé pour le calcul des contraintes . . . . .	170
4.20	Estimation des paramètres du ROI de la capitalisation des connaissances pour le processus de prédimensionnement, en étudiant sans et avec l'étape de rédaction des livrables	171
4.21	Calcul du ROI en fonction du nombre de recherches d'informations et en considérant ou non l'étape de rédaction des livrables . . . . .	171

# Acronymes

- BDC** Base de connaissances. 52, 53, 55, 62, 64, 65, 67, 68, 73, 74, 88, 89, 90, 91, 92, 101, 102, 103, 104, 105, 117, 120, 121, 122, 125, 128, 129, 130, 131, 135, 138, 139, 143, 149, 150, 151, 156, 157, 158, 163, 164, 170, 171, 172, 173, 179, 180, 182, 207, 213
- BDD** Base de données. 103, 104, 129, 130, 131, 132, 207, 213, 214
- BE** Bureaux d'Études. 2, 27, 113, 143, 146, 148, 161, 181
- CAO** Conception Assistée par Ordinateur ou *Computer-Aided Design*. 41, 42, 63, 64, 72, 85, 89, 104, 168
- CdCF** Cahier des Charges Fonctionnel. 3, 10, 13, 17, 19, 28, 30, 33, 34, 35, 38, 43, 70, 76, 77, 135, 136, 141, 142, 144, 145, 146, 148, 156, 157, 159, 174, 178
- DEE** Moteur de Conception et d'Ingénierie ou *Design and Engineering Engine*. 65, 83, 93, 101
- DRM** Méthodes de Recherche en Conception ou *Design Research Methodology*. 3, 8, 43, 44, 45, 47, 74, 118, 140, 174
- EF** Éléments Finis. 32, 38, 39, 40, 41, 104, 111, 130, 133, 135, 136, 143, 144, 167, 168, 169, 210
- IA** Intelligence Artificielle. 63, 64, 68, 111, 135, 139, 178, 182
- IAO** Ingénierie Assistée par Ordinateur ou *Computer-Aided Engineering*. 64
- IHM** Interface Homme-Machine ou *Human-Machine Interface*. 67, 92, 102, 128, 129, 130, 138, 139
- KANO** *Knowledge Aided design Software*. 5, 108, 115, 128, 129, 130, 131, 132, 134, 135, 136, 137, 140, 141, 143, 144, 147, 153, 156, 157, 159, 166, 167, 171, 173, 174, 207, 213
- KBE** Ingénierie basée sur les connaissances ou *Knowledge-Based Engineering*. 4, 5, 46, 48, 50, 53, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 72, 73, 74, 75, 76, 78, 83, 88, 89, 90, 92, 93, 94, 95, 98, 100, 101, 102, 103, 108, 109, 110, 113, 115, 120, 125, 126, 128, 131, 138, 140, 141, 143, 148, 151, 154, 155, 156, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 172, 173, 174, 175, 178, 179, 180, 181, 182, 207
- KBS** Système basé sur les connaissances ou *Knowledge-Based System*. 64, 65, 66, 69, 73, 75, 101, 102, 113, 125
- KNOMAD** Enrichissement des connaissances pour l'analyse et la conception multidisciplinaires optimales ou *Knowledge Nurture for Optimal Multidisciplinary Analysis and Design*. 65, 67, 101
- KPI** Indicateurs Clés de Performance ou *Key Performance Indicators*. 4, 5, 12, 50, 52, 75, 76, 77, 79, 80, 83, 88, 91, 92, 93, 95, 98, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 117, 118, 119, 120, 124, 128, 140, 142, 148, 149, 150, 151, 153, 156, 158, 161, 163, 165, 166, 167, 168, 170, 172, 173, 174, 175, 179

- MM** Méta-modèle. 3, 45, 47, 48, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 66, 84, 86, 93, 98, 101, 104, 105, 106, 107, 108, 122, 124, 125, 129, 131, 133, 138, 141, 170, 174, 178, 179, 180, 181, 182
- MMG** Générateur multi-modèles ou *Multi-Model Generator*. 65, 67, 70, 131
- MOKA** Méthodologie et outils orientés vers l'ingénierie basée sur la connaissance ou *Methodology and tools Oriented to Knowledge-based engineering Application*. 65, 66, 67, 101
- PDP** Processus de Développement de Produits ou *Product Development Process*. 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 16, 17, 18, 20, 23, 24, 25, 26, 27, 31, 32, 34, 35, 38, 39, 41, 42, 45, 46, 47, 48, 50, 60, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 84, 86, 88, 93, 94, 95, 98, 100, 101, 103, 104, 108, 109, 110, 112, 113, 115, 116, 118, 120, 125, 126, 128, 131, 140, 141, 150, 161, 165, 172, 173, 174, 175, 179, 180, 182
- PLM** Gestion du cycle de vie d'un produit ou *Product Lifecycle Management*. 67, 89
- POO** Programmation Orientée Objet. 64, 103
- QQQCOP** Qui ? Quand ? Quoi ? Comment ? Où ? Pourquoi ? ou *Who ? When ? What ? How ? Where ? Why ? (6W)*. 10, 57, 58, 60, 61, 62, 90, 92, 93, 98, 100, 103, 104, 105, 106, 107, 122, 124, 125, 131, 133, 135, 149, 153, 154, 156, 157, 179, 208
- R&D** Recherche et développement ou *Research and Development*. 2, 13, 26, 27, 28, 32, 34, 36
- ROI** Retour Sur Investissement ou *Return On Investment*. 2, 27, 52, 70, 72, 73, 74, 75, 88, 92, 93, 94, 110, 113, 114, 115, 119, 120, 121, 122, 125, 128, 130, 133, 149, 150, 151, 152, 156, 165, 166, 167, 169, 170, 171, 172, 173, 175, 179, 180
- TJM** Taux Journalier Moyen. 118, 148, 158
- TRL** Niveau de Maturité Technologique ou *Technology Readiness Level*. 27, 28, 32
- UML** Langage de Modélisation Unifié ou *Unified Modeling Language*. 58, 65, 105

# Introduction

### Contexte

Dans un contexte de dérèglement climatique où le contrôle des émissions carbonées devient une préoccupation de premier ordre, les industries aéronautique et spatiale doivent nécessairement réduire leurs émissions de CO<sub>2</sub> [1]. Plus particulièrement dans l'industrie aéronautique, les compagnies aériennes, qui exploitent les aéronefs, émettent une pollution liée à l'usage de l'avion par la combustion du carburant tandis que les fabricants des avions émettent une pollution liée à la fabrication des appareils. Cette différence fait apparaître deux moyens différents de décarboner l'industrie aéronautique : les compagnies aériennes vont chercher à diminuer leurs émissions par l'utilisation de bio-carburants, tandis que les constructeurs vont optimiser les rendements des moteurs thermiques ou réduire la masse embarquée. Des programmes de R&D (Recherche et développement ou *Research and Development*) sont également menés pour faire progresser des technologies alternatives qui pourraient mener à des innovations de rupture tout en étant moins carbonées [2, 3], en visant notamment le développement de l'avion à hydrogène ou de l'avion électrique.

Les BE (Bureaux d'Études) sont confrontés à des développements de produits de plus en plus complexes et dans des délais toujours plus courts pour satisfaire le marché et conserver un avantage concurrentiel. De plus, la complexité du développement de produits augmente à cause de multiples facteurs, que ce soit par les processus de fabrication employés (impression 3D métallique, asservissement pour de l'enroulement filamentaire, etc...), par les matériaux utilisés (composites, matériaux à mémoire de forme, risques géopolitiques pour l'approvisionnement) ou encore par les difficultés à optimiser des produits multidisciplinaires. Ces derniers englobent les produits, donc les systèmes manufacturés, nécessitant plusieurs disciplines différentes lors de la conception, comme par exemple l'aérodynamique, la thermique, l'électronique ou encore la mécanique ou l'étude des assemblages. Dans l'industrie aéronautique, les pièces d'aéronef sont des éléments d'ingénierie à forte valeur ajoutée et qui sont développées pendant des temps longs, allant de plusieurs mois à plusieurs années. La conception de tels produits est donc complexe et nécessite une grande variété de connaissances de la part des ingénieurs comme la connaissance des contraintes de fabrication et de coûts de la pièce, des différents procédés de fabrication et traitements (usinage, fonderie, traitement thermique, traitement de surface, etc...), le choix des matériaux ainsi que les méthodes de dimensionnement en fonction des spécifications et de la durée de vie souhaitée. L'entreprise a donc intérêt à capitaliser un maximum de connaissances sur l'ensemble de ces domaines de compétence afin de servir de levier de performance dans les futurs développements de produits.

### Problèmes

L'enjeu de la capitalisation des connaissances n'est pas d'apporter une innovation de rupture, mais plutôt de créer un socle de connaissances solide que l'entreprise peut d'une part valoriser en tant que ressource, et d'autre part consolider par l'ajout de nouvelles connaissances [4, 5]. Cette démarche de capitalisation permet en théorie des gains pour l'industriel mais est très peu implémentée en pratique à cause de l'incertitude autour des outils ou approches à utiliser, ou du ROI (Retour Sur Investissement ou *Return On Investment*) qui est difficilement estimable pour l'industriel, ce qui le rend hermétique aux travaux scientifiques réalisés jusque-là. Les problématiques associées à la non-capitalisation des connaissances sont nombreuses pour une entreprise. La première est tout simplement la perte de ces

connaissances métier, qui peuvent constituer le cœur de son activité et son avantage concurrentiel, si les employés les plus expérimentés quittent l'entreprise sans avoir pu les transmettre ou les formaliser. Cette perte impose de ré-obtenir les connaissances ce qui peut représenter une perte de temps ou d'argent conséquente pour l'industriel. La perte de temps que peut engendrer la recherche d'informations est également un problème récurrent qui découle de la non-capitalisation des connaissances, tout comme la perte d'informations entre les décisions prises et le contexte lié aux prises de décision. Le fait de ne pas garder une trace de ces processus ne permet pas d'étudier le processus décisionnel, qui pourrait conduire à de meilleurs choix (techniques, stratégiques ou autres) durant les futurs processus. Ce point en particulier a des conséquences sur les capacités des industriels à identifier les outils ou méthodes adaptés à un processus et à un contexte de développement donné, ce qui ne permet pas d'identifier des leviers de performance pour la conception de produits. Enfin, le dernier problème de la non-capitalisation des connaissances est l'incapacité de réutiliser des travaux déjà réalisés dans de futurs projets. En développement de produits, cela revient à refaire les mêmes actions et à résoudre les mêmes problématiques techniques, projet après projet, sans parvenir à optimiser les tâches à faible valeur ajoutée, ce qui ne conduit à aucune amélioration du temps nécessaire pour concevoir un produit.

### Objectifs

La capitalisation des connaissances permet de répondre à un certain nombre de ces problématiques ce qui doit conduire à une amélioration de la performance de conception. L'étude proposée dans ce manuscrit est double. Le premier objectif est d'implémenter une approche de conception basée sur la capitalisation et la réutilisation des connaissances dans un environnement industriel, et le second objectif est d'identifier les indicateurs capables de quantifier le gain de performance obtenu entre le processus de conception initial et le processus de conception employant ces nouveaux outils. Cette proposition sera ensuite validée sur des activités de conception élémentaires puis sur un cas d'étude industriel simplifié de développement de lignes et d'arbres de transmission d'hélicoptères en composite. L'analyse des indicateurs doit permettre, à terme, d'identifier les méthodes et outils adaptés à un PDP (Processus de Développement de Produits ou *Product Development Process*) donné, compris entre la réception du CdCF (Cahier des Charges Fonctionnel) et la fin de la conception préliminaire.

### Méthode de recherche

La recherche académique doit pouvoir s'appliquer dans des environnements pratiques, industriels, de façon à apporter des solutions aux problématiques du terrain. Malgré les travaux de recherche académiques pour structurer les sciences de la conception, le manque d'harmonisation des méthodes, du lexique ou des outils rend la comparaison entre les différents travaux difficile. Blessing et Chakrabarti proposent alors la DRM (Méthodes de Recherche en Conception ou *Design Research Methodology*) pour structurer les sciences de la conception [6]. Un manque est identifié dans les outils de représentation des propositions de recherche en sciences de la conception, et [7] proposent une première version de MM (Méta-modèle) pour formaliser les propositions de recherche autour de principes généraux communs. L'instanciation du méta-modèle se construira tout au long de ce manuscrit dans le but de décrire explicitement les apports scientifiques de ce travail, dans une perspective de validation et de comparaison entre les travaux présentés et futurs travaux à venir de la communauté scientifique.

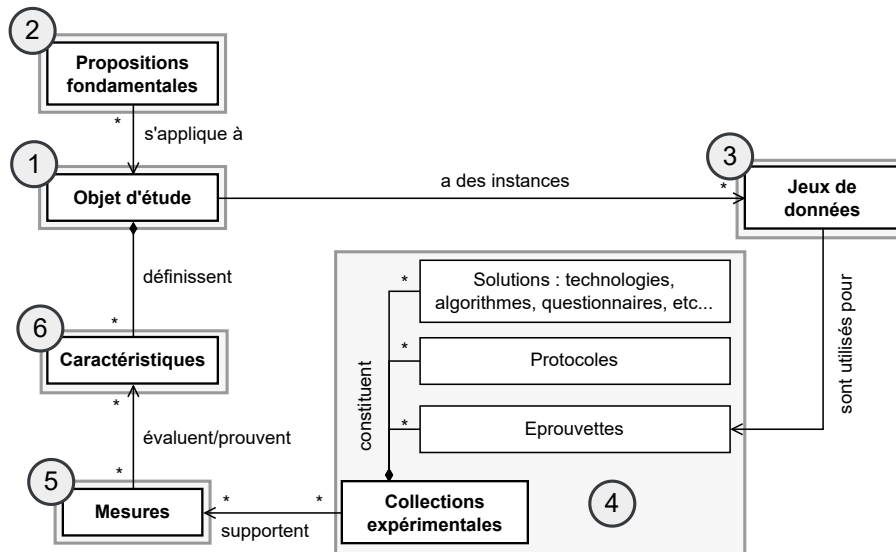


FIGURE 1 – Méta-modèle d’instanciation d’un socle commun pour la validation d’une proposition fondamentale pour un objet d’étude donné

Un des points d’attention clés, d’après [7], est la définition de l’environnement qui permet, s’il est bien défini, de comparer différentes études entre elles. Dans le cadre de notre étude, l’environnement est identifié comme le développement produit à forte valeur ajoutée dans le secteur de l’aéronautique. Sur la base de la figure 1, le manuscrit de thèse est structuré de la façon suivante :

- *Chapitre 1.* Le contexte de développement produit dans le secteur aéronautique est présenté à travers l’exemple du développement de lignes et d’arbres de transmission en composites, dont les activités de conception intègrent les **jeux de données (3)**. Le PDP représente notre **objet d’étude (1)** et a vocation à, d’une part, illustrer la difficulté d’évaluer la performance d’un processus de conception, également appelée performance développée. D’autre part, le PDP sert à étudier l’impact sur la performance développée de l’utilisation d’outils KBE (Ingénierie basée sur les connaissances ou *Knowledge-Based Engineering*) et de la capitalisation des connaissances métier. Ce deuxième point représente une partie de la **proposition fondamentale (2)**, qui est le postulat initial à vérifier à l’issue des travaux de thèse. De cette proposition découle une problématique sur l’analyse des choix des outils à utiliser ou à développer pour répondre au mieux au besoin de performance industrielle.
- *Chapitre 2.* La construction de la **collection expérimentale (4)** est fondée sur l’analyse de l’état de l’art de la littérature scientifique, et s’articule autour de trois axes. Le premier axe concerne la capitalisation des connaissances métier et la gestion de ces connaissances, le deuxième axe concerne l’étude des méthodes KBE en tant que ressources capitalisantes du processus métier et enfin le dernier axe concerne l’étude des KPI (Indicateurs Clés de Performance ou *Key Performance Indicators*) du processus métier, du processus de capitalisation ainsi que des ressources utilisées par le processus métier. L’analyse de l’état de l’art met en lumière les limites des approches existantes et oriente vers les propositions de ces travaux pour améliorer la performance

développée de notre **objet d'étude (1)** et sur la définition d'un système de mesure capable de mesurer ces gains.

- *Chapitre 3.* Les conclusions et limitations identifiées dans l'état de l'art aident à identifier les pistes d'amélioration et ainsi construire notre proposition scientifique. Cette proposition viendra enrichir la **collection expérimentale (4)** par l'ajout d'une méthode de capitalisation des connaissances métier, ainsi que par l'ajout de KPI de mesure de la performance développée à différentes échelles de ce processus métier. Le système de mesure proposé est orienté autour de trois composantes. La première est pour l'évaluation de la performance du processus métier, la deuxième sert à quantifier le potentiel de développement ou d'utilisation d'un outil comme ressource au processus métier, et enfin la troisième et dernière composante concerne l'évaluation de la performance de capitalisation des connaissances.
- *Chapitre 4.* Ce chapitre propose tout d'abord une implémentation du logiciel KBE, KANO (*Knowledge Aided design Software*), en tant que nouvel objet de la **collection expérimentale (4)**, et qui sera utilisé pour valider la proposition de thèse. La validation s'appuie sur les **jeux de données (2)** identifiés pour réaliser des **mesures (5)** avec les KPI du système de mesure proposé au chapitre 3. Les **mesures (5)** évaluent certaines **caractéristiques (6)** de notre **objet d'étude (1)**, à travers l'étude des processus métier sans et avec l'utilisation des outils KBE développés. Les **caractéristiques (6)** du processus de capitalisation et des outils métier sont également mesurées pour caractériser l'ensemble du PDP. La **mesure (5)** des **caractéristiques (6)** de notre **objet d'étude (1)** permet finalement d'évaluer la **proposition fondamentale (2)** formulée au début des travaux.

Le manuscrit est finalement clôturé par les conclusions de ces travaux de recherche ainsi que les perspectives identifiées pour poursuivre les démarches initiées.



# Chapitre 1

## Contexte industriel et problématique

### Contenu

---

<b>1.1</b>	<b>Contexte des travaux de recherche</b>	<b>9</b>
<b>1.2</b>	<b>Notion de performance de développement</b>	<b>13</b>
<b>1.3</b>	<b>Processus de développement de produits</b>	<b>16</b>
1.3.1	Définition du processus de développement	16
1.3.2	Présentation des processus de développement de produits	18
1.3.3	Caractéristiques du processus de conception du secteur aéronautique	23
<b>1.4</b>	<b>Identification du processus initial pour l'application de la proposition</b>	<b>27</b>
1.4.1	Le processus de développement de produits de Nexteam Group	27
1.4.2	Le processus de prédimensionnement de Nexteam Group	31
<b>1.5</b>	<b>Les activités de conception de Nexteam Group</b>	<b>35</b>
1.5.1	Le calcul des contraintes de torsion	38
1.5.2	Le calcul des fréquences	40
1.5.3	Autres activités de conception	41
<b>1.6</b>	<b>Validation des recherches en sciences de la conception</b>	<b>43</b>
<b>1.7</b>	<b>Conclusion et problématique</b>	<b>47</b>

---

---

Après avoir rapidement introduit le contexte de réalisation de ces travaux, le premier chapitre structure le cadre de ces travaux de thèse avec les sections présentées ci-dessous :

- La première section introduit tout d’abord le contexte industriel et scientifique de l’étude, et présente les différents processus sur lesquels ces travaux se concentrent. Cette section se conclut sur les objectifs visés par les études menées.
- La deuxième section introduit la notion de performance dans un contexte de développement de produit, afin de définir un référentiel sémantique commun et de clarifier de premiers indicateurs associés.
- La troisième section est focalisée sur la définition des PDP (ou processus de conception de produit), d’abord avec leurs principales caractéristiques, puis plus spécifiquement aux secteurs aéronautique, spatial et défense dans un second temps.
- La quatrième section introduit le processus de conception de référence de l’entreprise Nexteam Group, partenaire et financeur des travaux réalisés, soit le processus de conception actuel pour la conception de lignes de transmission de puissance et d’arbres de transmission en composite.
- La cinquième section détaille les activités de conception du processus métier de l’entreprise Nexteam Group, en se concentrant sur les deux activités principales réalisées lors du prédimensionnement des lignes et arbres de transmission.
- Puis, la sixième et avant-dernière section présente la démarche de validation des résultats de recherche dans le domaine des sciences de la conception, en particulier à travers l’étude de la DRM.
- Enfin, la septième et dernière section guide vers la conclusion et les problématiques identifiées.

### 1.1 Contexte des travaux de recherche

Les recherches menées dans le cadre de ces travaux de thèse ont pour périmètre l'industrie aéronautique, mais certains résultats obtenus sont extensibles à d'autres secteurs comme l'automobile, le ferroviaire, l'énergie ou encore le naval en fonction des caractéristiques étudiées. L'industrie aéronautique présente la particularité de concevoir et fabriquer des pièces à forte valeur ajoutée produites en faibles cadences et quantités. Le livre blanc de la mécanique, édité par l'Association Française de Mécanique (AFM), caractérise les domaines aéronautique et spatial par des temps de développement et d'exploitation longs, de l'ordre de 5 à 10 ans pour les développements et 10 à 40 ans pour l'exploitation des appareils [8]. De même, les ordres de grandeur des quantités produites sont de plusieurs milliers à millions pour des industries comme automobile, tandis que l'aéronautique représente une production de quelques dizaines à quelques centaines d'unités. Dans ce contexte, les industriels cherchent à améliorer leur productivité en jouant sur plusieurs leviers, dont l'innovation, l'optimisation de leurs produits et de leurs processus, par la diminution des coûts, ou encore par l'amélioration des processus de conception. L'*International Air Transport Association* (IATA) identifie également différents objectifs en 2011 pour le secteur aéronautique dans l'objectif d'atteindre une aviation durable d'ici à 2050 [9]. Parmi ces objectifs, on peut retrouver la réduction des émissions d'oxydes d'azote (NOx) à -75 %, la réduction des émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) proportionnelle à l'amélioration des rendements énergétiques et ils prévoient que les émissions de monoxyde de carbone (CO) auront quant à elles pratiquement disparu. D'autres objectifs sont également formalisés sur les émissions acoustiques, avec une prévision du niveau sonore proche des aéroports équivalent au niveau sonore du trafic routier ou ferroviaire. Ces objectifs ont été réaffirmés dans un rapport plus récent [10] basé sur l'étude de *the Royal Netherlands Aerospace Centre* (NLR), et *SEO Economics*. Pour parvenir à ces objectifs ambitieux d'ici à 2050, les ingénieurs doivent et devront s'attacher à résoudre certains des leviers scientifiques et technologiques identifiés par [8], en particulier s'ils permettent d'optimiser la masse, la motorisation ou l'aérodynamisme des appareils. Bien que tous les leviers de la performance apparaissent comme interdépendants, les travaux de cette thèse se concentrent sur l'étude des premières phases du processus de développement de produits, le PDP, car la majorité du coût final d'un produit - de l'ordre de 80 % - est déterminé avant la définition de son design final [11, 12]. Ullman [13] définit par ailleurs « le paradoxe de conception » : le manque de connaissances du produit se fait ressentir lors des premières phases du développement, là où il y a le plus de latitude dans les choix de conception, tandis que pour les phases de conception avancées cette connaissance s'est accumulée grâce aux connaissances métier des équipes. À mesure que le PDP progresse, l'éventail des choix techniques se réduit considérablement, et le coût des changements augmente exponentiellement [12]. Il apparaît donc important de maximiser la performance de développement en optimisant le PDP pour qu'il intègre le maximum d'éléments impactant le prix final du produit dès les premières étapes de conception, et ce afin de réduire au maximum le coût de revient du développement. Le levier favorisé, et qui est étudié dans ces travaux de thèse, est donc l'analyse de la capacité de l'industriel à capitaliser ses connaissances métier et à les réutiliser pour améliorer la performance développée, la performance du PDP. La performance est tout d'abord considérée à travers les prismes des temps et coûts de développement, mais de nouvelles définition viendront enrichir la notion de « performance » dans la suite de ces travaux.

Par ailleurs, les grands défis scientifiques identifiés par l'AFM représentent des relais potentiels pour améliorer la performance et peuvent fournir, par leur résolution, de nouveaux outils et méthodes à travers la simulation numérique, le calcul haute performance (HPC), la modélisation des incertitudes

ou encore les lois de modélisation de la mécanique. Parmi ces recommandations, la performance de la simulation numérique est au cœur du problème puisque l'objectif est d'obtenir des modélisations de plus en plus fidèles grâce aux puissances de calcul qui augmentent. Cette hypothèse de fidélité des modèles est cependant forte puisqu'elle requiert de lever deux contraintes au préalable. La première contrainte est la capacité de prendre en compte les erreurs et les incertitudes dans les modélisations, que ce soient les incertitudes apportées par la variabilité naturelle des essais expérimentaux, qui vont donner deux résultats très légèrement différents pour une expérience similaire, ou bien la variabilité intrinsèque d'un matériau comme les composites par exemple, où deux pièces fabriquées avec la même matière peuvent donner des résultats d'essais encore une fois légèrement différents [14]. La deuxième contrainte est liée aux lois de modélisation, qui peuvent être complexifiées à mesure que les puissances de calcul augmentent pour intégrer de plus en plus de paramètres impactant le résultat final. Il existe un véritable enjeu sur la modélisation de matériaux non-homogènes, dont les composites, mais également sur les matériaux avec des comportements non-linéaires et sur les modélisations multi-physiques. Par exemple, les propriétés mécaniques des matériaux composites sont dépendantes des propriétés de la matière de base (du renfort et de la matrice) mais également du procédé de fabrication pour l'obtention du produit final. De ce fait, la capacité à modéliser le couple matériau-procédé améliore la capacité prédictive de la simulation, et permet de gagner en performance en limitant les coûts associés à la fabrication de prototypes d'essais.

La figure 1.1 illustre la définition donnée au PDP à travers une représentation IDEF0 du processus, dont le détail est présenté dans la prochaine section. Le PDP contient un ensemble d'activités métier, qui correspondent à l'ensemble des tâches qui s'enchaînent pour développer un produit. En parallèle de ces activités métier se trouvent les activités de capitalisation. Elles correspondent aux étapes de formalisation des connaissances et du contexte de réalisation des activités. Le PDP est ainsi constitué de deux processus qui évoluent en parallèle, un processus métier qui est formé par l'enchaînement des activités métier, et un processus de capitalisation constitué de l'enchaînement des activités de capitalisation. Ces activités, métier et de capitalisation, sont réalisées au moyen de ressources diverses comme des logiciels, des méthodes, des ressources humaines, etc... Enfin, ces activités sont réalisées pour répondre aux objectifs et contraintes prédéfinies, généralement un CdCF pour des activités d'ingénierie.

Durant le PDP, certains éléments sont capitalisés par les concepteurs à travers le processus de capitalisation. Ce processus de capitalisation est très dépendant des stratégies et outils déployés par chaque industriel pour capitaliser ses différentes connaissances. Les connaissances des produits sont généralement les plus capitalisées durant le PDP par les différents rapports de conception ou d'essais par exemple. En revanche, les connaissances métier, donc les méthodes et contraintes qui aboutissent à la définition de l'espace des solutions, sont plus rarement capitalisées car elles nécessitent de justifier la réalisation des activités. Cela permet de capturer un lien entre les causes et les conséquences lors du processus d'ingénierie. La définition du contexte des activités métier s'articule autour du QQQCOP (Qui ? Quand ? Quoi ? Comment ? Où ? Pourquoi ? ou *Who ? When ? What ? How ? Where ? Why ? (6W)*). Les réponses à chacune de ces questions définissent un contexte complet et aident à structurer de la connaissance des produits en de la connaissance métier [15]. Or, ces éléments ne sont que très ponctuellement capitalisés, et rarement avec toutes les composantes QQQCOP simultanément, par retour d'expérience industriel. Ce faible taux de capitalisation des connaissances du PDP, des produits comme des métiers, se traduit ainsi par une flèche pointillée sur la figure 1.1 de la sortie des activités

## 1.1. CONTEXTE DES TRAVAUX DE RECHERCHE

---

métiers jusqu'à l'entrée des activités de capitalisation. Un des enjeux de cette thèse réside donc dans la capacité à identifier et déployer un processus de capitalisation des connaissances métier adapté et qui permet un gain de performance développée dans le futur.

Un des moyens utilisés, pour transférer les connaissances capitalisées vers de nouvelles ressources utilisables dans le processus métier, est le couplage entre les modèles de simulation corrélés et les outils d'aide à la conception qui sont utilisés dans les processus métier [8]. Les modèles de simulation corrélés assurent le lien entre les modèles numériques et les essais expérimentaux qui valident les performances du produit. Ils supportent également la capitalisation d'un large éventail de connaissances, allant des règles de modélisation aux moyens de mise en œuvre des essais, en passant par les limites des méthodes utilisées, et ils aident ainsi à structurer les connaissances au sein d'un modèle d'ingénierie. De même que la capitalisation des connaissances métier du PDP, le taux de réutilisation dans le PDP des connaissances capitalisées demeure faible et restreint à quelques exemples en raison de la difficulté d'implémentation. Cela est donc représenté par un trait pointillé, plus espacé que le passage des activités métiers aux activités de capitalisation, pour montrer la difficulté que les connaissances ont à être réexploitées. Les concepteurs valorisent difficilement les connaissances, acquises durant les activités passées, lors des activités métiers d'un futur PDP. Cela représente donc notre deuxième enjeu qui consiste à définir des moyens de réutiliser efficacement les connaissances capitalisées durant les futurs PDP, notamment à travers la définition d'outils capables de guider et faciliter le travail des concepteurs.

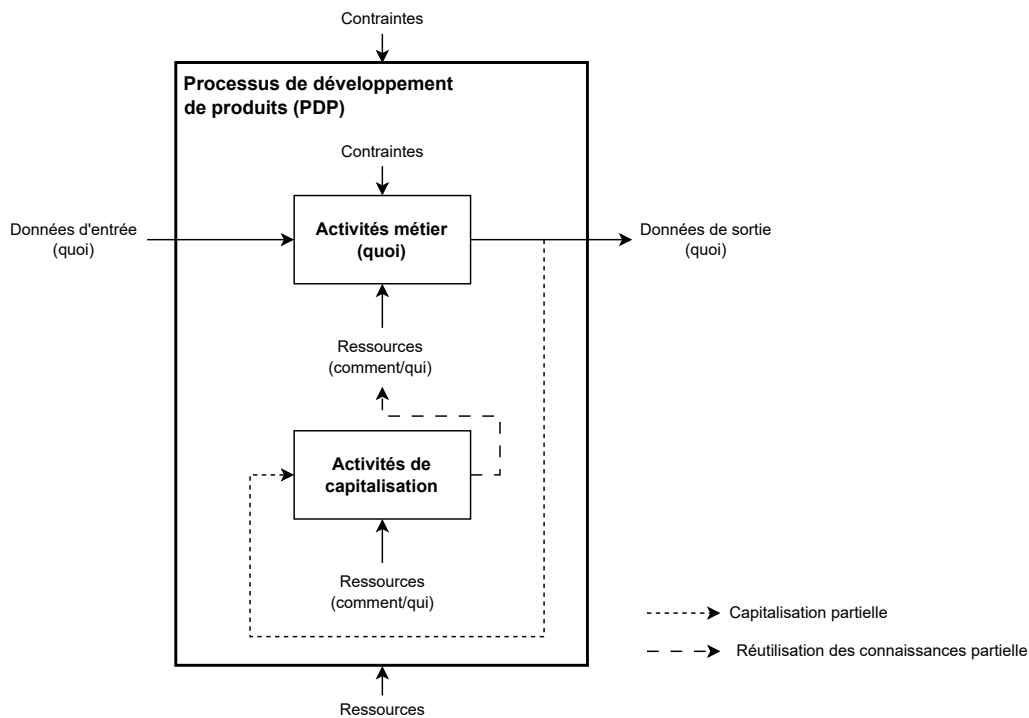


FIGURE 1.1 – Définition du processus de développement de produits à travers les interactions entre le processus métier et le processus de capitalisation des connaissances

## 1.1. CONTEXTE DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Enfin, le dernier enjeu de ces travaux est d'identifier les KPI capables de mesurer l'influence sur la performance du PDP, en fonction des choix techniques réalisés sur les moyens de capitalisation et de réutilisation des connaissances. Cet axe de recherche dirige donc vers l'analyse de la performance liée au choix des différentes ressources utilisées lors des activités métier et des activités de capitalisation. L'analyse de la performance est mesurable sur différentes entités et à différentes échelles, et elle sera présentée plus en détail lors de la prochaine section. Elle est par exemple mesurable à l'échelle du produit [16], à l'échelle du processus métier [17, 18, 16], du processus de capitalisation [19, 20, 21] ou bien des ressources ou des outils utilisés [22]. Bien qu'il existe quelques KPI pour mesurer certaines de ces caractéristiques, il n'existe cependant pas d'approches, ni méthodes, qui articule l'ensemble de ces indicateurs de façon à étudier l'impact du choix d'une ressource ou d'un moyen de capitalisation sur la performance développée, ce qui constitue un verrou technique que nous nous attacherons à lever. Ces objectifs sont résumés sur la figure 1.2 : les ressources (en bleu) sont à définir pour les activités et processus étudiés, tout comme les KPI (en jaune). Une fois ces éléments formalisés, l'objectif est d'identifier les liens entre les ressources et les indicateurs, pour évaluer l'impact du choix d'une ressource sur la performance des activités (et processus) métier et de capitalisation, symbolisés par les flèches vertes. La performance des outils en eux-mêmes est également à considérer dans l'étude de la performance du PDP.

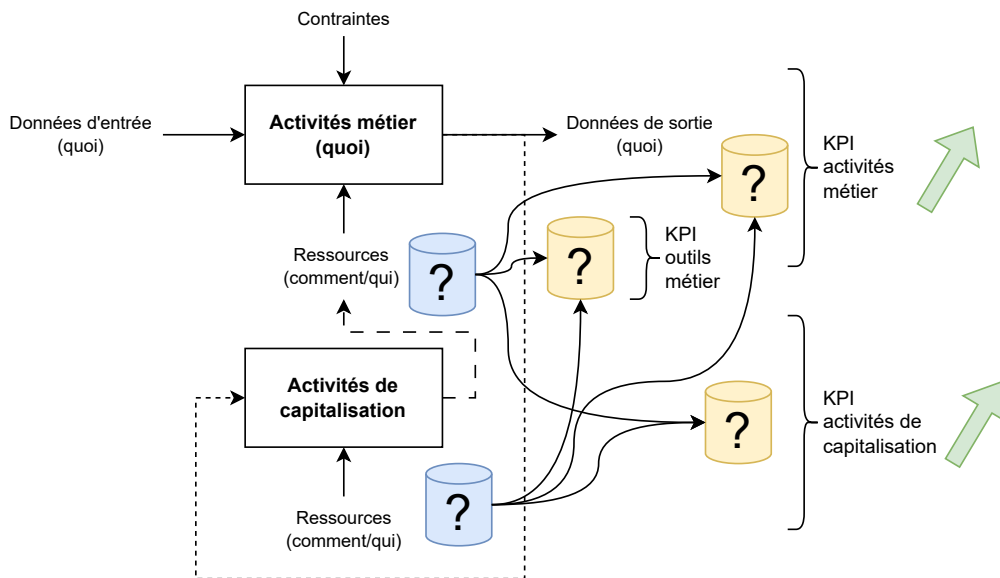


FIGURE 1.2 – Identification des enjeux et objectifs de ces travaux autour du processus de développement de produits

Les sections suivantes de ce chapitre vont s'attacher à présenter plus en détail les différents éléments de la figure 1.1. La prochaine section va présenter la notion de « performance », puis viendront ensuite les sections pour présenter les PDP, d'abord en général puis celui plus spécifique du secteur aéronautique, avant de finir sur le PDP de Nexteam Group, l'entreprise partenaire et financeur de ces travaux de thèse. L'étude des différents éléments fera évoluer la figure 1.1 tout au long du manuscrit, afin d'aboutir à la comparaison entre le processus initialement présenté dans cette section introductive, et le processus final développé à l'issue de ces travaux.

### 1.2 Notion de performance de développement

Précédemment, il a été fait mention de la « performance de développement », ou « performance développée », sans pour autant la définir. C'est ce à quoi nous nous attacherons dans un premier temps. Le terme « développée » fait référence à la période durant laquelle le produit est en développement. Il existe également d'autres prismes pour aborder la performance, comme la « performance de production » (ou « performance produite ») - qui correspond à la performance obtenue lors de la fabrication d'un produit - ou encore la « performance opérationnelle » - qui correspond à la performance liée à l'utilisation d'un produit. La performance développée se mesure donc durant le processus de développement qui s'étend de l'obtention des spécifications du CdCF pour aboutir sur la production d'un produit. Le détail du PDP sera présenté dans les sections suivantes. Or, comme il a déjà été précisé dans l'introduction, le secteur aéronautique est caractérisé par des temps longs de développement, de plusieurs années pour passer d'un CdCF à un produit certifié, ce qui n'est pas compatible avec le cadre de notre étude qui est limitée à un peu moins de trois ans. En conséquence, ces travaux de thèse se concentrent sur la « performance développée » d'un sous-processus de développement de produits, compris entre la réception du CdCF et l'obtention d'une conception préliminaire prédimensionnée. Ainsi, l'objectif est de parvenir à quantifier la performance de l'industriel sur sa capacité à se positionner avec des délais, des coûts et une qualité maîtrisée lors d'appels à projets. Pouvoir répondre rapidement et à moindre coût à un appel d'offres pour le développement d'un produit permet, en théorie, de réinvestir le temps gagné dans diverses autres actions d'étude et de développement ou en R&D, en innovant, afin de gagner ou maintenir un avantage concurrentiel. Rappelons également que l'objectif d'une entreprise est de dégager un bénéfice sur la production de biens ou de services pour le marché [23], ce qui induit que le bénéfice doit être une grandeur positive. Cela se traduit simplement par le fait d'obtenir une quantité en retour plus importante que la dépense réalisée pour obtenir une différence positive. Démontrer que les gains obtenus sont supérieurs aux dépenses réalisées constitue l'objectif du système de mesure et des indicateurs à utiliser pour mesurer cette performance.

L'utilisation du terme « performance » dans la littérature scientifique est caractérisée par un « manque de rigueur » avec une certaine frange des travaux qui publient sur cette thématique sans explicitement définir le périmètre de leur recherche [16]. L'analyse bibliographique réalisée par Neely et al. [24] fait état d'une « mesure de la performance [qui est] souvent débattue mais rarement définie ». Meyer et Gupta [25] suggèrent qu'il y a « un désaccord massif sur ce qu'est la performance » ce qui conduit à une multiplication des mesures dont une partie ne permet pas d'améliorer la compréhension de la performance au sein de l'organisation : c'est ce qu'ils nomment le « paradoxe de la performance ».

Différentes définitions de la performance peuvent être trouvées dans la littérature, dont certaines sont retranscrites dans le tableau 1.1 ci-dessous. O'Donnell et Duffy [16] catégorisent certains travaux comme des définitions explicites de la performance, comme les travaux de [26] ou [27], et d'autres qui font plutôt référence aux « dimensions de la performance » comme [28] ou [29]. D'autres auteurs donnent des définitions de la performance inférées sur la base des informations à disposition [30] ou au travers des objectifs atteints [31]. Il est également fréquent de retrouver la définition de la performance associée aux définitions de l'efficacité (*efficiency*) et de l'efficacités (*effectiveness*) [18]. En général, l'efficacité fait référence à l'atteinte des objectifs tandis que l'efficacités est plutôt relative à l'utilisation des ressources et au rendement.

## 1.2. NOTION DE PERFORMANCE DE DÉVELOPPEMENT

TABLE 1.1 – Définitions de la performance (extrait de [18] et complété)

Définition	Référence
La performance est l'efficacité ( <i>efficiency</i> ) et l'efficacités ( <i>effectiveness</i> ).	[32]
La performance est le niveau à partir duquel un but est atteint.	[26]
La performance est l'efficacité ( <i>efficiency</i> ) et l'efficacités ( <i>effectiveness</i> ) d'une action déterminée ( <i>purposeful</i> ).	[24]
La performance est une interrelation complexe entre sept critères de performance : efficacité ( <i>effectiveness</i> ), efficacité ( <i>efficiency</i> ), qualité, productivité, qualité de vie au travail, innovation, rentabilité/budgétisation.	[27]
La performance est une action intentionnelle.	[33]
La performance est la qualité totale du produit, le délai d'exécution et la productivité (niveau des ressources utilisées).	[28]
La performance est le temps de développement, la productivité du développement (l'utilisation des ressources) et la qualité totale de la conception.	[29]
La performance devrait être définie comme une réalisation concrète, un aboutissement ou un résultat.	[34]
La performance est l'acquisition et l'analyse d'informations sur la réalisation effective des objectifs et des plans de l'entreprise, ainsi que sur les facteurs susceptibles d'influencer cette réalisation.	[30]
La performance est le processus consistant à déterminer dans quelle mesure les organisations ou les individus ont réussi à atteindre leurs objectifs.	[31]

La performance de développement revêt une double signification : elle concerne à la fois le produit conçu, qui se doit d'avoir le niveau de qualité attendu par le client ou le marché, mais également les activités impliquées dans l'obtention du produit développé. Il coexiste donc, en parallèle, des objectifs de conception associés aux produits et des objectifs liés aux activités de conception [16]. Bien qu'il existe une distinction entre ces deux performances, elles sont toutes les deux en lien avec la performance globale du processus. Les objectifs de conception sont relatifs au produit dans la façon de la décrire, donc cela va concerner sa forme, ses fonctionnalités, ses propriétés ou encore son comportement, tandis que les objectifs des activités de conception sont plutôt de considérer les temps et coûts des ressources utilisées lors du développement. Les modèles conçus pour mesurer la performance dans un contexte de développement de produits sont « quasi-exclusivement concentrés sur les performances du produit » [16] et non sur les performances des activités et du processus de conception.

La plupart des définitions données dans le tableau 1.1 sont liées à celles de l'efficacité (*efficiency*) et de l'efficacités (*effectiveness*), de sorte qu'il n'est pas évident de comprendre comment évaluer chacune de ces quantités séparément. Pour répondre explicitement à cette problématique, O'Donnel et Duffy [16] proposent un modèle théorique basé sur la norme IDEF0 [35]. Un modèle IDEF0 générique est représenté par un rectangle, représentant l'activité à réaliser, qui utilise des ressources (bas du rectangle) pour transformer des entrées (gauche du rectangle) en des sorties (droite du rectangle) dans le respect des objectifs et contraintes imposés (haut du rectangle). Les entrées font référence aux éléments préalables à la réalisation de l'activité, ce qui peut être des connaissances initiales, des données,

## 1.2. NOTION DE PERFORMANCE DE DÉVELOPPEMENT

---

ou encore des produits. Les sorties sont des objets similaires aux entrées mais dans un état final correspondant à la réalisation de l'activité. Les ressources référencent l'ensemble des moyens à disposition pour la réalisation de l'activité, soit des ressources humaines, des méthodes, des outils, des documents, ou encore des logiciels - cette liste n'étant pas exhaustive. Enfin, les objectifs et/ou contraintes sont des objets de connaissance permettant de guider la réalisation de l'activité d'un état initial jusqu'à un état final, parmi lesquels il est possible de retrouver les justifications de réalisation de l'activité, les risques ou encore les remarques associées à cette réalisation, entre autres. La représentation théorique en IDEF0 est présentée sur la figure 1.3 ci-dessous.

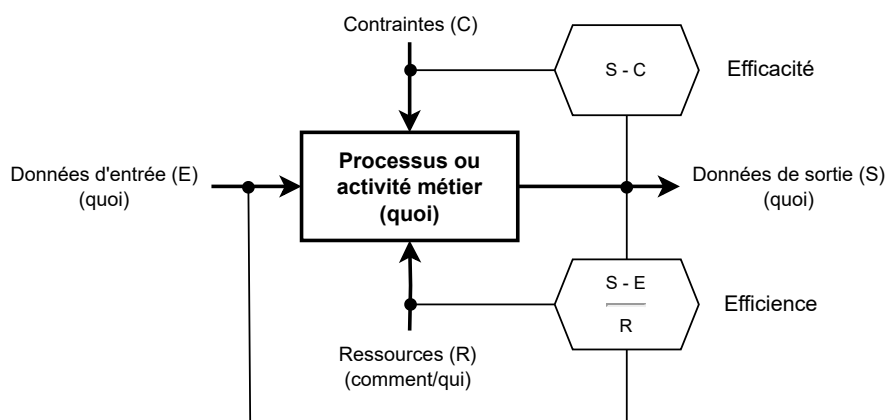


FIGURE 1.3 – Efficacité et efficacité d'une activité, représentation selon IDEF0 (extrait et adapté de [16])

Sur la base de la représentation par modélisation IDEF0, dont les fondamentaux sont rappelés par [35], O'Donnell et Duffy complètent le modèle par la définition de deux mesures de la performance associées à l'exécution de l'activité. Tout d'abord, l'efficacité est définie comme la différence entre les sorties et les objectifs/contraintes - cela permet d'identifier dans quelle mesure les sorties obtenues sont conformes aux objectifs de réalisation de l'activité. Ensuite, l'efficacité est définie comme la différence des sorties avec les entrées, divisée par les ressources utilisées et traduit une notion de rendement ou de coût de performance de l'activité. L'efficacité est généralement plus simple à mesurer que l'efficacité car elle peut se mesurer sur une base temporelle ou financière (ou n'importe quelle autre grandeur commune). Comme présenté précédemment, la performance développée finale est liée à l'efficacité ainsi qu'à l'efficacité de la réalisation des activités. Dans certains cas, la réalisation des activités sera plutôt efficace, d'autres fois plutôt efficace, parfois les deux en même temps - ce qui est le cas optimal - ou bien aucune des deux.

## 1.3 Processus de développement de produits

### 1.3.1 Définition du processus de développement

À ce stade du manuscrit, le PDP, ou processus de conception de produits, est également un terme qui a été utilisé sans avoir été défini, ce qui est l'objet de cette section. Le PDP a toutefois été introduit en figure 1.1, incluant des activités métier et des activités de capitalisation.

Le terme PDP est généralement utilisé sans une définition préalablement posée du fait de son apparence auto-descriptive. En pratique, il permet de faire référence au processus, c'est-à-dire un ensemble d'activités, dont l'objectif est d'aboutir à un nouveau produit. Cependant, les subtilités de la définition apparaissent dans la définition du périmètre de ce processus, en fonction de son commencement et de fin supposés [18]. Le tableau 1.2 ci-dessous nous permet d'avoir une vue d'ensemble des différentes définitions présentes dans la littérature scientifique.

La définition du PDP est déterminante dans la performance développée obtenue car le processus conditionne l'ordre dans lequel les tâches sont à réaliser ainsi que les moyens et ressources à utiliser. Cette structure d'enchaînement d'activités, qui peut se représenter sous la forme de nœuds et de branches, peut s'optimiser pour tirer le maximum de performance, c'est-à-dire obtenir un produit de même niveau de qualité finale mais conçu avec des coûts et des délais optimisés.

TABLE 1.2 – Différentes définitions du processus de développement de produits (extrait de [18] et complété)

Définition	Référence
Le processus de conception consiste à dimensionner, développer et réaliser des produits, systèmes, processus, services, plateformes et des expériences dans le but de répondre à des besoins identifiés, supposés ou demandés et dans le respect des contraintes définies ou imposées.	[36]
Le développement de produits est la transformation d'une opportunité de marché en un produit disponible à la vente.	[37]
Le développement de nouveaux produits comprend les activités de l'entreprise qui conduisent à un flux d'offres de produits nouveaux ou modifiés sur le marché au fil du temps. Cela comprend la création d'opportunités, leur sélection et leur transformation en produits et en activités (services) offerts aux clients, ainsi que l'amélioration dans les activités de développement de nouveaux produits elles-mêmes.	[38]
Le développement de produits est l'organisation efficace et la gestion des activités telles que l'entreprise parvient avec succès à commercialiser ses produits avec des temps de développement courts et des faibles coûts de développement.	[39]
Processus particulier qui permet de convertir les besoins des clients en une solution technique commercialisable.	[40]

Suite en page suivante

### 1.3. PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS

---

Table 1.2 – Suite

Définition	Référence
Le processus de développement de produits est un processus industriel ( <i>business</i> ), un ensemble d'activités dont le but est l'obtention d'un produit ou d'un service répondant aux besoins d'un client interne ou externe à l'entreprise.	[41]
Le processus de développement correspond à définir des spécifications techniques puis à imaginer et développer des concepts pour les satisfaire, et le processus s'achève une fois que le concept vérifie et valide l'ensemble des spécifications.	[42, 43]
Le développement de produits est l'ensemble des activités qui commence par les outils et les processus utilisés pour percevoir une opportunité de marché et qui se termine par la production, la vente et la livraison d'un produit, répondant à cette opportunité de marché.	[44]

La première conclusion qui apparaît avec cette synthèse des définitions du PDP de la littérature scientifique est leur grande similarité. Comme précisé par Cedergren [18], toutes ces définitions décrivent l'obtention d'un nouveau produit, mais toutes ne considèrent pas la notion de performance ou n'intègrent pas le processus commercial, pas plus que l'ensemble des étapes de mise en point et tests qui peuvent représenter une grande part du processus. Sur la base de ces définitions, le PDP est défini pour le contexte de ces travaux de recherche comme suit :

« Le processus de développement de produits est l'organisation efficace et la gestion des activités telles que l'entreprise parvient à commercialiser ses produits avec des temps et des coûts de développement en accord avec le besoin initialement identifié ou formulé par un client. »

Dans le contexte de notre étude, qui pour rappel est limitée en temps, l'analyse du PDP complet, de la définition des besoins à la livraison du produit final au client, n'est pas possible. En effet, le PDP prévisionnel dure au moins aussi longtemps de la durée des travaux de recherche, ce qui ne laisse pas le temps de bien définir le périmètre de l'étude, de réaliser l'étude et de tirer les conclusions sur la base des résultats obtenus. De ce fait, l'étude du PDP devient donc une étude du sous-processus de développement de produits qui s'arrête à l'obtention d'un système prédimensionné qui répond au CdCF, excluant la phase de commercialisation ainsi que certaines composantes de la phase d'« évaluation », comme les essais expérimentaux. Le PDP étudié devient ainsi le processus de prédimensionnement, et la définition du PDP spécifique à notre contexte d'étude devient :

« Le processus de développement de produits est l'organisation efficace et la gestion des activités telles que l'entreprise parvient à identifier et définir un concept technique avec des temps et des coûts de développement en accord avec le besoin initialement identifié ou formulé par le client. »

### 1.3. PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS

---

Ce cadre d'étude omet de fait un certain nombre d'activités propres au PDP classique du secteur aéronautique. On peut citer en premier lieu la conception détaillée ainsi que les campagnes d'essais, qui sont essentielles pour, d'une part, complètement définir le système ainsi que les moyens de production qui lui sont associés et, d'autre part, pour démontrer et valider par essais que le produit conçu respecte bien les spécifications formulées. Ce dernier point est important dans le secteur aéronautique puisqu'il permet de diminuer les marges de sécurité utilisées lors du dimensionnement des pièces. À titre d'exemple, une marge de 25 % est utilisée pour les fréquences opérationnelles de l'appareil lors du prédimensionnement de lignes de transmission sur un hélicoptère, pour est diminuée à 20 % après des essais réalisés sur bancs d'essai, et enfin à 15 % pour des essais réalisés dans des conditions représentatives, par exemple sur appareil.

La prochaine partie s'attache à présenter les principales approches de conception, pour comprendre comment sont structurés les PDP, avec notamment les différentes étapes de conception, pour mieux appréhender le périmètre de cette étude. Les définitions et structures des PDP serviront de base pour introduire le PDP de l'entreprise Nexteam Group, ainsi que le processus de prédimensionnement utilisé pour ces travaux de recherche.

#### 1.3.2 Présentation des processus de développement de produits

##### La conception complète

Depuis les années 1980, les académiques formalisent et structurent les modèles et méthodes de conception afin de fournir un cadre de réflexion unifié aux différents acteurs. Au sein des propositions qui ont émergé, on peut retrouver les approches de « conception complète » (*total design*), dont la structure provient du programme SEED (*Sharing Experience in Engineering Design*) [45] ou encore des travaux de Pugh [46] représentés sur la figure 1.4.

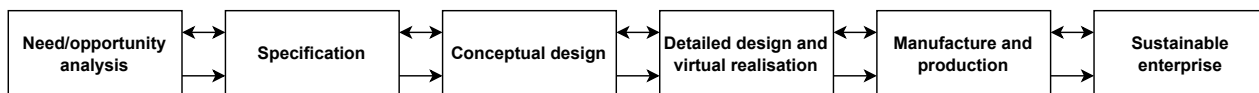


FIGURE 1.4 – Processus de la conception complète (concept de [46], visuel adapté de [36])

Cette architecture contient les principales briques des PDP utilisées dans l'industrie. Cela découle des réflexions et itérations basées sur les retours des industriels. Le processus est représenté comme une suite séquentielle d'activités, car plusieurs étapes s'enchaînent pour aboutir au produit final. Il existe cependant la possibilité de retourner dans les étapes antérieures en cas de limite ou problématique identifiées trop tardivement, d'où la présence des doubles flèches. Cette approche induit que chaque nouvelle étape permet une amélioration du produit, et que le retour ne peut se faire qu'étape par étape si des problèmes de conception, fabrication, montage, ou autre apparaissent durant le développement.

### 1.3. PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS

---

Les différentes étapes de l'approche de conception complète sont :

- **Analyse du besoin ou opportunité** : l'entreprise réalise une analyse de marché ou identifie une opportunité pour lancer ou améliorer un produit qui répond au besoin ou à la problématique identifiée.
- **Définition du besoin** : l'entreprise, ou une personne, identifie un potentiel marché pour un produit ou un processus. Le besoin peut également provenir de la volonté d'améliorer ou d'optimiser un produit existant - qu'il soit interne ou externe à l'entreprise. Cette étape se conclut sur l'établissement du CdCF.
- **Recherche et analyse des concepts de solutions** : les premières phases de développement concernent les études conceptuelles pour explorer au maximum l'espace des solutions et sélectionner les produits candidats les plus prometteurs. L'étude d'un maximum de concepts différents est importante pour être sûr de n'oublier aucun bon candidat potentiel pour l'étude finale d'une part, mais aussi pour faire l'exercice de se mettre à la place de concurrents pour imaginer des solutions alternatives d'autre part. À l'issue de cette phase le (ou les quelques) meilleur concept est utilisé pour poursuivre l'étude en conception détaillée.
- **Conception détaillée** : c'est l'étape la plus avancée du processus de dimensionnement, durant laquelle les caractéristiques géométriques, dimensionnelles, les matériaux ou encore les spécifications géométriques et dimensionnelles sont déterminés. Ces caractéristiques sont obtenues par l'utilisation d'outils d'ingénierie ainsi que par les connaissances métier des concepteurs. Ces outils permettent d'analyser les concepts techniques au regard des contraintes spécifiées dans le CdCF, de façon à arbitrer entre différents choix techniques et ne retenir que le meilleur concept qui sera à produire.
- **Fabrication et production** : la fabrication est l'étape suivante logique une fois l'étude des concepts achevée. Même si elle est représentée comme une étape séparée sur la Figure 1.4, les concepteurs doivent tenir compte dès leur conception détaillée des contraintes de fabrication ou encore de montage. De plus, en fonction des matériaux sélectionnés, ils doivent être compatibles avec les moyens de production et que les compétences à disposition pour ne citer qu'eux, et le tout en respectant un coût de production préalablement identifié. Ces considérations sont par ailleurs tellement importantes que les stratégies de conception orientée pour l'assemblage (*Design For Assembly*), de conception orientée pour la fabrication (*Design For Manufacture*) ou encore de conception orientée pour le recyclage (*Design For Recycling*), entre autres, ont vu le jour [47]. Le prototypage ainsi que les divers essais de développement et de mise au point nécessaires à l'élaboration du produit sont également compris dans cette phase d'étude, qui s'achèvera une fois entrée dans une phase de production.
- **Pérennisation** : cette ultime phase du processus consiste à récupérer le maximum d'informations possibles sur le produit comme les retours clients, les défaillances ou encore les problèmes liés à la logistique, le tout dans la perspective d'optimiser les processus et de pérenniser l'ensemble.

### 1.3. PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS

Pour ce processus de la conception complète, Baxter [48] propose avec la figure 1.5 une modélisation des activités de conception pour chacune des étapes du PDP présentées sur la figure 1.4. La figure 1.5, extraite des travaux de synthèse de [36], propose une chronologie des différentes activités usuelles du PDP sur laquelle les itérations sur les choix des concepts se font pour rechercher la bonne offre compatible avec un marché. Ce sera seulement une fois que l'offre est clairement identifiée comme répondant à un besoin que les études de conception avancées sont réalisées.

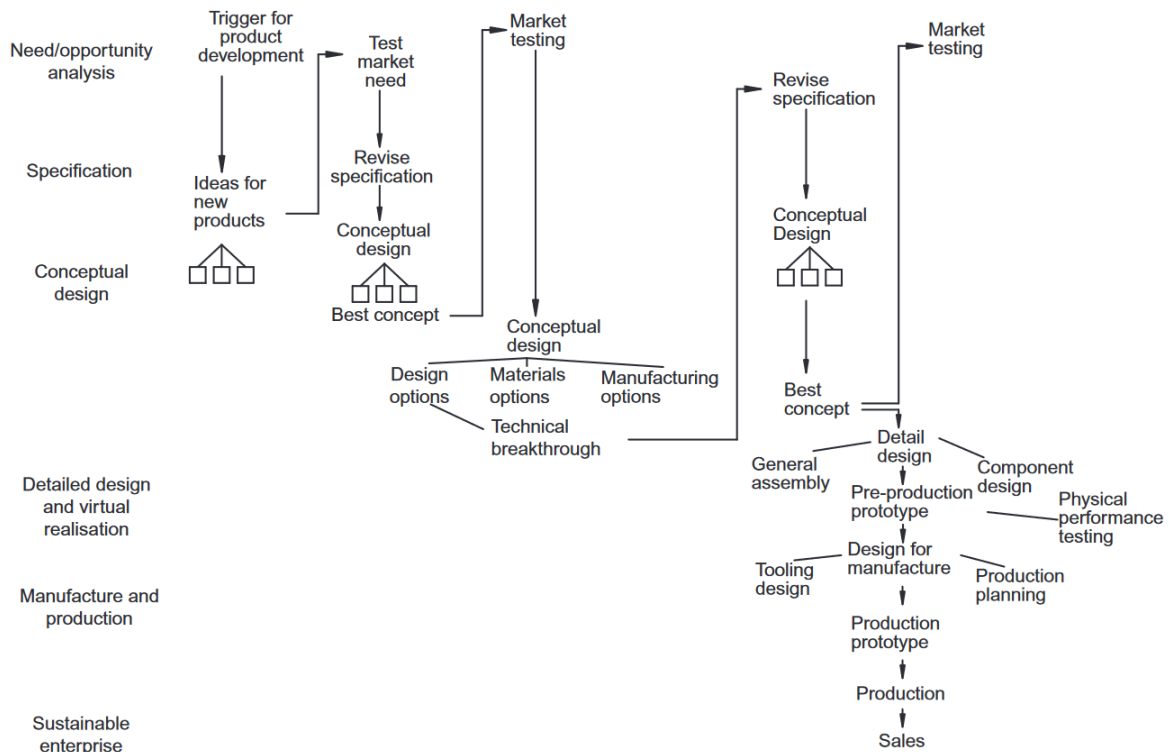


FIGURE 1.5 – Activités de conception dans un processus de conception complète (concept de [48], mis en forme et extrait de [36])

#### La conception systématique

En raison de l'augmentation croissante de la complexité et de la multidisciplinarité des systèmes à développer, la conception est maintenant assurée par des équipes complètes, afin de maîtriser l'ensemble du processus de développement et de production. C'est dans ce contexte que Pahl et Beitz formalisent la conception systématique (*systematic design*) dans les années 1990 [49, 50]. Depuis, cette approche fait figure de référence pour définir un processus de conception générique, adapté à n'importe quel secteur d'activité ou à n'importe quel produit. Leur approche découpe le processus de conception en quatre étapes distinctes, positionnées sur la droite de la figure 1.6 (adapté par [36]) ci-dessous :

- la planification du processus de conception et l'identification des tâches (*product planning and clarifying the task*) ;

### 1.3. PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS

- la définition des concepts (*conceptual design*);
- le prédimensionnement (*embodiment design*);
- la conception détaillée (*detail design*).

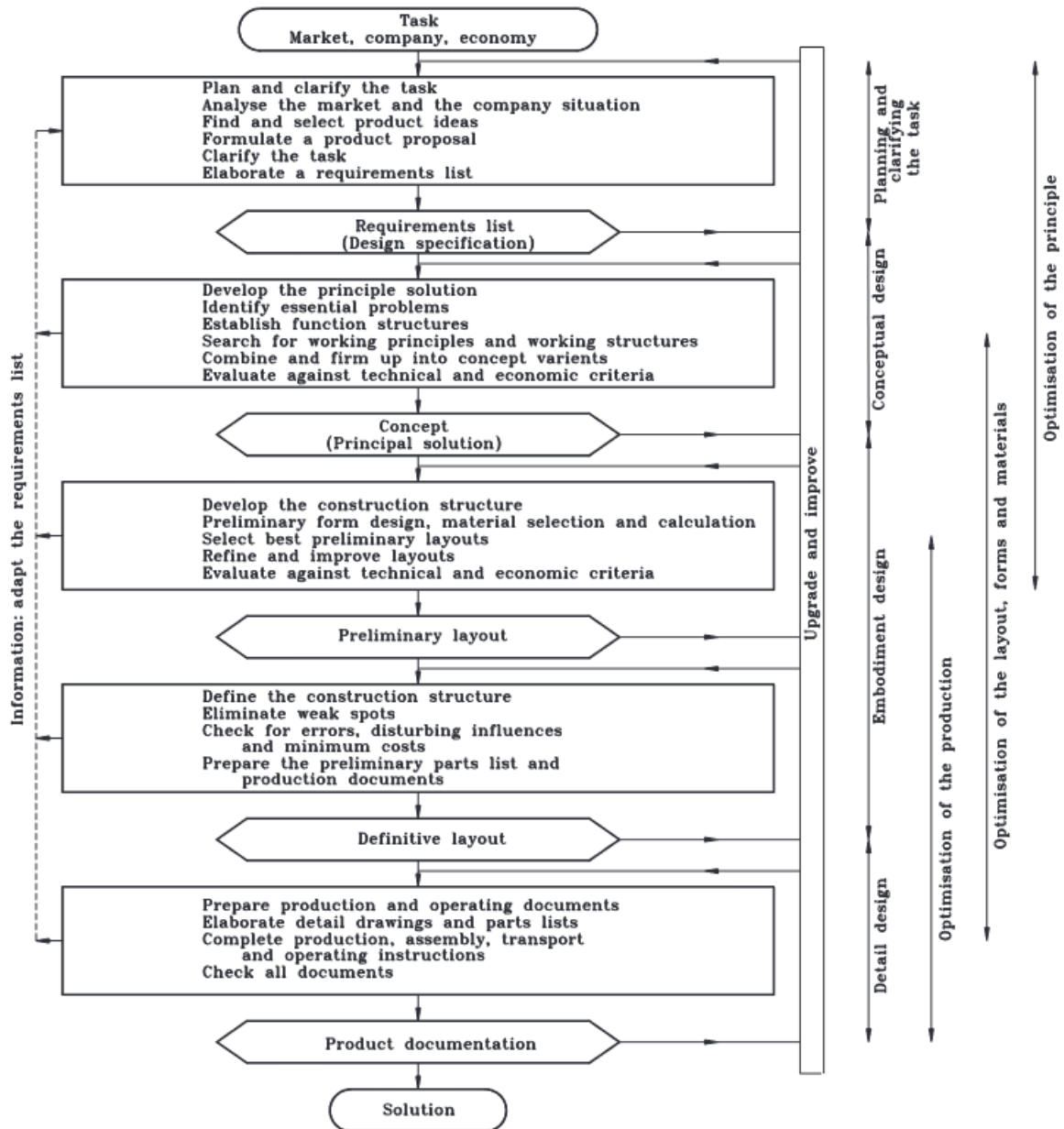


FIGURE 1.6 – Approche systématique de Pahl et Beitz [50] (extrait de [36])

La figure 1.6 détaille les principales étapes déjà formalisées par Pugh [46], et qui sont suffisamment génériques pour englober l'ensemble des projets de développement. La formalisation d'une approche systématique du processus de développement de produits passe par la rationalisation du processus de conception et de fabrication d'un système.

D'après [36], les principales critiques faites à ce modèle concernent sa tendance à s'étendre sur chaque possibilité en imaginant l'ensemble des cas possibles, le transformant en une sorte de « *check-list* » à vérifier. La grande rigueur des modèles proposés peut également freiner les concepteurs plus « intuitifs » dans l'approche très linéaire et séquentielle qui est proposée.

#### La conception axiomatique

La théorie de la conception par axiomes - ou axiomatique - émerge à la fin des années 1970 avec les travaux du Pr. Nam P. Suh [51]. Cette théorie est basée sur l'hypothèse qu'« il existe un ensemble de règles fondamentales qui déterminent les bonnes pratiques de conception ». Fan et al. [52] soulignent cependant les difficultés de la méthode à passer d'un cadre universitaire à un cadre industriel. La théorie de la conception axiomatique est composée de quatre corps principaux, selon [53], représentant les domaines de conception, voir la figure 1.7, des relations pour relier des domaines ainsi que de deux axiomes qui constituent les piliers de la méthode :

- **Axiome 1** : maintenir l'indépendance des besoins fonctionnels autant que possible.
- **Axiome 2** : minimiser la quantité d'informations dans la conception.

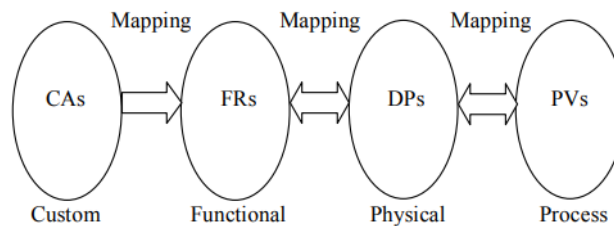


FIGURE 1.7 – Composition des quatre domaines relatifs à la conception (extrait de [52])

La conception axiomatique se base sur quatre domaines de conception liés par des relations : 1) la customisation (CAs) est orientée unidirectionnellement vers les fonctions (FRs), 2) les fonctions (FRs) sont aussi reliées, bidirectionnellement, à l'espace des paramètres clés de conception (DPs) et enfin 3) ces derniers sont reliés bidirectionnellement aux processus (PVs). L'enjeu de la conception axiomatique réside principalement dans la capacité à lier (FRs) à (DPs), ce qui consiste à associer les propriétés géométriques aux besoins fonctionnels du produit ou système. Ces relations sont représentées, comme dans [51] et [54], par :

$$[FR] = [A][DP] \quad \text{Où } [A] \text{ est appelée la matrice de conception.}$$

L'étude bibliographique menée par Tate [55] sur les conceptions axiomatiques énonce quelques perspectives de recherche potentielles sur : les corrélations entre des mesures sur le processus de conception axiomatique et le niveau d'innovation, la création d'ontologies de (FRs) et (DPs) via du *data mining* ou du traitement du langage naturel, la propagation de solutions technologiques entre domaines technologiques, l'extension des concepts de conception axiomatique au développement de technologies et enfin la dissémination des méthodes de conception axiomatiques pour faciliter leur adoption dans un usage plus courant (dans l'industrie).

### 1.3. PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS

---

Un exemple de conception axiomatique dans le secteur aéronautique est proposé pour le dimensionnement d'arbres de transmission supercritiques [56]. Ce travail formalise une théorie non-linéaire de représentation des interfaces de l'arbre avec la méthode axiomatique, ce qui permet de modéliser une grande variété de comportements dynamiques. Mais ce type d'approche devient rapidement difficile à étendre pour des lignes de transmission, ou tout autre système présentant de forts couplages entre différents composants, à cause de la difficulté à respecter le premier axiome.

En ce qui concerne le périmètre de ces travaux, les processus de conception sont peu basés sur la conception axiomatique en raison des multiples interactions entre les domaines métier qui sont nécessaires au développement d'un produit (mécanique, électrique, fluide, fabrication, logistique, maintenance, etc...). L'approche systématique, dans l'esprit de ce qui est proposé par Pahl et Beitz, est généralement mise en application dans notre contexte d'étude pour son approche structurée de la conception. Cependant, dans le secteur aéronautique, cette approche n'est pas suffisante, et c'est pourquoi la prochaine section présente plus en détail les processus de conception du secteur aéronautique.

#### 1.3.3 Caractéristiques du processus de conception du secteur aéronautique

Maintenant que le PDP est défini, nous pouvons caractériser les spécificités du PDP dans le secteur aéronautique, qui est également similaire dans les secteurs du spatial et de la défense en raison de leurs caractéristiques similaires (temps de développement longs, technologies duales, etc...). De par la grande criticité des systèmes fabriqués, les PDP de ces secteurs d'activité se sont dotés d'étapes de contrôle tout au long du cycle de conception. Ce principe de processus intercalés par des jalons (ou revues) de contrôle se retrouve dans la littérature sous les termes de « porte de contrôle » généralement attribué aux travaux de Cooper [57]. L'objectif, à travers ces jalons de contrôle, est d'obtenir la plus petite boucle itérative possible, d'après Pahl et Beitz [49, 50], par un contrôle systématique des éléments clés qui valident le passage d'une étape de la conception. Il existe ainsi une alternance entre des phases de travail (les activités de développement) et des phases de contrôle (les portes de contrôle, ou revue de projet), inspirées des approches de la « qualité ». Une illustration de l'approche selon Cooper est présentée sur la figure ci-dessous :

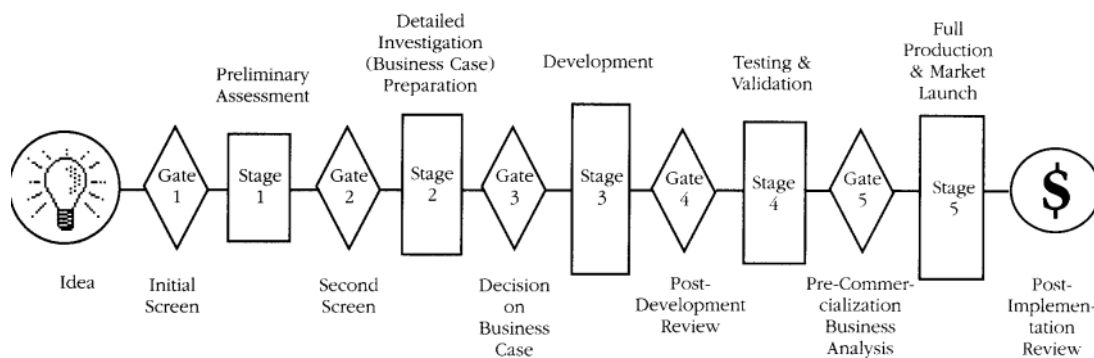


FIGURE 1.8 – Principe d'un processus de conception avec portes de contrôle (extrait de [57])

### 1.3. PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS

Le secteur de la défense, puis les secteurs à forte valeur ajoutée comme l'aéronautique et le spatial, ont proposé une structure de base du PDP et de ses jalons de contrôle à travers les *Systems Engineering Fundamentals* [58], dont le squelette général est représenté sur la figure 1.9. L'ingénierie des systèmes est un domaine interdisciplinaire de l'ingénierie et de la gestion de l'ingénierie qui se concentre sur la manière de concevoir, d'intégrer et de gérer des systèmes complexes tout au long de leur cycle de vie. De cette figure inspirée des processus « cycles en V », cinq jalons sont identifiés pour contrôler les avancées de la conception, lors de la phase de descente, puis pour contrôler le bon déroulement des activités de fabrication, d'intégration ainsi que de tests lors de la phase ascendante. Les cinq jalons identifiés permettent de retrouver les principales phases du PDP comme sur les figures 1.8 (issue de [57]) et 1.6, parmi lesquelles une première phase d'identification et de synthèse des spécifications, puis une phase de conception préliminaire suivie d'une phase de conception détaillée, avant de conclure par les phases de fabrication et d'assemblage puis de tests, à l'échelle des composants puis des systèmes. Entre ces différentes étapes, les jalons de contrôle garantissent le bon déroulement du PDP.

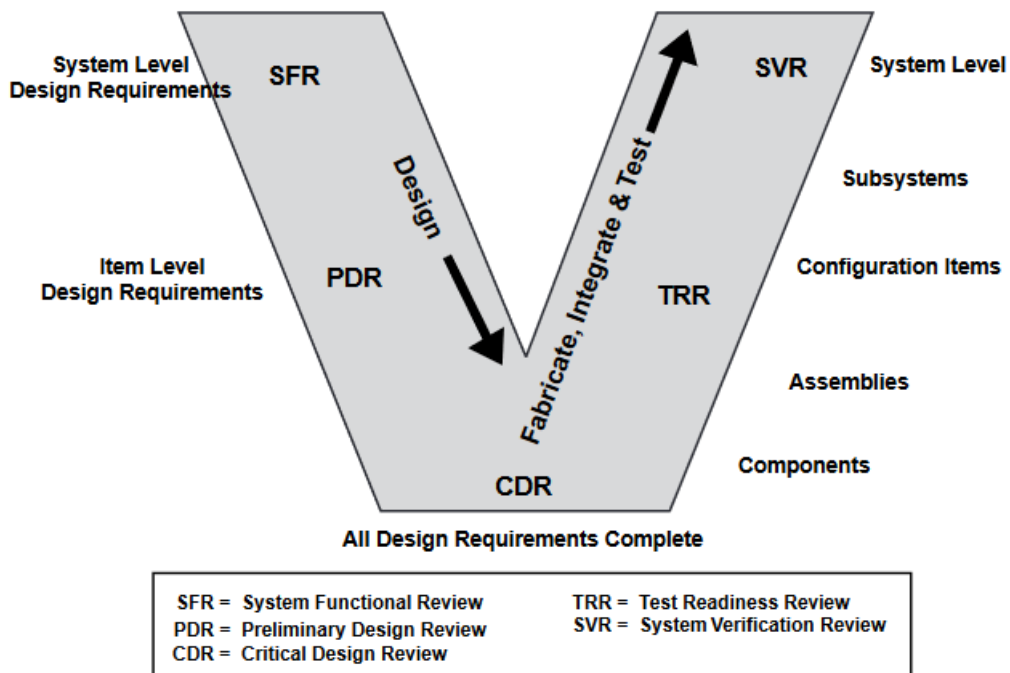


FIGURE 1.9 – Structure de l'ingénierie système et des vérifications (extrait de [58])

Les objectifs et livrables principaux de chaque revue d'avancement du processus de développement de systèmes, tel qu'ils sont définis dans [58], sont résumés dans le tableau suivant :

### 1.3. PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS

TABLE 1.3 – Synthèse des principales revues de développement de système

Nom	Description	Exemple de livrables associés
<i>System Functional Review</i> (SFR) ou revue des spécifications du système	Cette revue garantit l’approbation d’une architecture fonctionnelle du système, avant de passer au développement avancé du système et de l’ensemble des sous-systèmes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Analyse fonctionnelle</li> <li>- Analyse des risques</li> <li>- Vérification des spécifications par rapport aux besoins de l’utilisateur final</li> <li>- Analyse des ressources (logistiques, humaines, etc...)</li> </ul>
<i>Preliminary Design Review</i> (PDR) ou revue de conception préliminaire	L’objectif est de valider l’état d’avancement et de maturité de la conception des systèmes et sous-systèmes (ainsi que les logiciels) par rapport aux spécifications formulées.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Données de conception du système dont les composants, les équipements, les logiciels, etc...</li> <li>- Modèles utilisés, éprouvettes ou prototypes d’aide à la conception</li> <li>- Données fournisseurs de composants spécifiques</li> <li>- Rapport d’analyse et de documentation de la conception</li> </ul>
<i>Critical Design Review</i> (CDR) ou revue de conception critique	Cette étape a pour but de vérifier la conception et de valider les besoins de production. Il s’agit de valider la conception du système, et de l’ensemble des sous-systèmes, mais également le système de production prévisionnel par rapport aux besoins de production spécifiés. Les premiers plans d’essais pour la validation expérimentale sont également étudiés pour maximiser les chances de réussites lors de la phase de tests.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Complément des documents de la PDR mis-à-jour</li> <li>- Évaluation des KPI de conception</li> <li>- Plans d’essais prévisionnels</li> <li>- Planification jusqu’à la fin du projet</li> </ul>
<i>Test Readiness Review</i> (TRR) ou revue de préparation aux essais	Cette revue permet d’évaluer les objectifs, les procédures et le pilotage des ressources lors des essais à venir.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procédures, plans et protocoles d’essais</li> </ul>
<i>System Verification Review</i> (SVR) ou revue de vérification système	Cette revue permet de valider que les systèmes produits (y compris les prototypes et les systèmes de production) répondent bien aux spécifications demandées et aux essais réalisés. Ces évaluations techniques peuvent donner lieu à la production série si les évaluations techniques sont positives.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gestion du cycle de vie du produit intégralement prévue</li> <li>- Validation complète des revues précédentes</li> <li>- Gestion des risques à jour</li> <li>- Planification de production à jour</li> <li>- Identification des KPI de production</li> </ul>

Une synthèse graphique de PDP utilisé dans le secteur aéronautique est proposée figure 1.10, issue de [12], explicitant clairement les différents jalons ainsi que les différentes tâches à accomplir pour

### 1.3. PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS

pouvoir valider chaque revue et achever le développement avec succès. Ces définitions évoluent en fonction des enjeux et des types de projets (programme aéronautique, R&D, autre), suivant le secteur ou encore suivant la taille des acteurs. Pour n'illustrer que l'exemple d'un projet de R&D, l'objectif final est rarement le développement d'une ligne de fabrication et d'assemblage pour assurer une production série dès la fin du processus de conception. Certaines adaptations sont donc nécessaires sur les attentes et les livrables de chaque phase du projet en fonction des différents paramètres.

Si les objectifs finaux des projets et les jalons réalisés peuvent diverger, deux revues techniques se retrouvent de façon systématique dans l'ensemble des processus de conception : la PDR et la CDR. Notre périmètre d'étude s'arrête à l'issue de la première, avec l'évaluation de la performance du PDP sur les premières étapes de conception jusqu'à l'obtention d'un concept technique satisfaisant. Ces deux jalons permettent de s'assurer que les objectifs du projet pourront être atteints par l'étude des concepts et, sinon, aide à réorienter le projet dans une nouvelle direction atteignable, ou à l'abandonner si la direction choisie ne permet pas de rattraper le temps déjà passé sur le développement. En général, un certain nombre de recommandations sont formulées lors de ces jalons pour corriger ou approfondir des points techniques, ou apporter des études complémentaires sur des éléments insuffisamment matures au regard des objectifs.

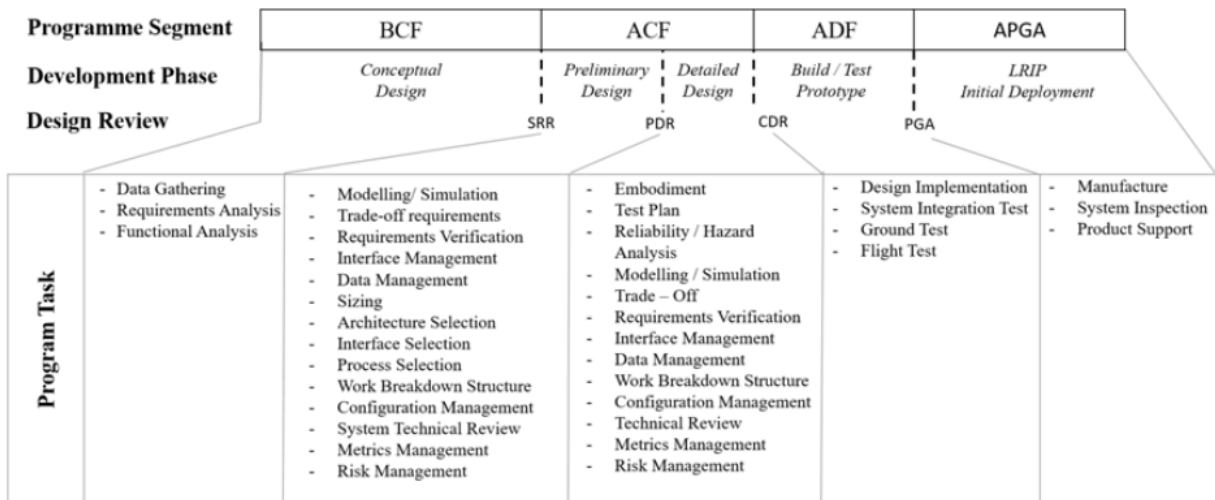


FIGURE 1.10 – Vue d'ensemble du processus de développement de produits incluant les phases, les revues ainsi que les tâches attendues (extrait de [12])

La prochaine section s'attache à présenter le PDP de l'entreprise Nexteam Group, ainsi qu'à identifier le processus qui sera utilisé pour la mise en œuvre de la proposition scientifique.

### 1.4 Identification du processus initial pour l'application de la proposition

#### 1.4.1 Le processus de développement de produits de Nexteam Group

Maintenant que le PDP dans le secteur aéronautique a été explicité, nous allons nous attacher à décrire le processus de conception propre à l'entreprise étudiée. Nexteam Group est une entreprise dont le cœur de métier est le travail du métal pour le secteur aéronautique : usinage (titane, aluminium, acier et inconel), fonderie (aluminium) et tôlerie. La majorité des ressources de l'entreprise sont orientées vers la production de pièces pour le marché aéronautique, mais il existe également une division BE qui se charge de réaliser diverses études de développement de ce type de pièces, également pour les secteurs du spatial et de la défense, ainsi que des projets de R&D. Comme mentionné dans l'introduction, notre objet d'étude est le PDP dans le secteur aéronautique, avec une attention portée de la réception des spécifications jusqu'au prédimensionnement d'une solution. La considération de ce secteur fait que le processus industriel de référence reprend une grande partie de la structure type du PDP présenté à la section précédente, sur les figures 1.9 et 1.10. L'explicitation de ce processus est importante pour définir un processus de référence pour les études de l'entreprise, ainsi que pour identifier les perspectives d'amélioration.

Afin de mieux appréhender le PDP, deux contextes de développement sont susceptibles d'apparaître : le développement en tant qu'équipementier ou le développement technologique dans le cadre de projets de R&D. Chacun de ces deux contextes de développement va être présenté ci-dessous, en précisant leurs spécificités.

**Les projets équipementiers** vont être caractérisés par un temps de développement de quelques mois à quelques années pour répondre à un besoin technique de court à moyen terme. Les spécifications techniques peuvent être communiquées dès le lancement du projet, mais il est fréquent qu'elles soient coconstruites entre la maîtrise d'ouvrage qui va spécifier son besoin et la maîtrise d'œuvre qui va informer sur les faisabilités et limitations techniques. À l'issue du processus de conception, la maîtrise d'œuvre doit être capable d'assurer la qualité et le suivi individuel des pièces produites par l'intermédiaire de divers documents de traçabilité afin de pouvoir engager les procédures nécessaires à l'apparition de n'importe quelle problématique durant le cycle de vie du produit. Les projets équipementiers sont caractérisés par une obligation de résultats dans les délais impartis sous peine de pénalités. Enfin, conformément aux processus de développement en vigueur dans le secteur aéronautique tels que présentés précédemment, les projets équipementiers vont être structurés autour des principaux jalons de gestion de projet : le *Kick-Off Meeting* (KoM) pour lancer le projet et initier les échanges sur les spécifications techniques, la *Preliminary Design Review* (PDR) pour figer un design qui convient à l'ensemble des acteurs et enfin une *Critical Design Review* (CDR) pour affiner le design, les documents qualité et préparer la production du système.

**Les projets de R&D** ont vocation à faire progresser le TRL (Niveau de Maturité Technologique ou *Technology Readiness Level*) sur une technologie et ou un procédé spécifique en vue de l'obtention de futures parts de marché. Ce sont des projets sur lesquels une partie de l'innovation est financée sur fonds propres, et une autre partie est financée par des subventions. Le ROI de ce type de projet peut n'apparaître qu'au bout de plusieurs années à plusieurs dizaines d'années - quand il arrive. En effet, il

## 1.4. IDENTIFICATION DU PROCESSUS INITIAL POUR L'APPLICATION DE LA PROPOSITION

---

est fréquent que les avancées réalisées sur ce type de projet ne permettent pas d'atteindre une viabilité économique de la solution. À titre d'exemple, l'impression 3D métallique reste un procédé cher et peu rapide en production, ce qui ne permet pas de l'utiliser sur de grosses cadences ou la production de pièces à faible valeur ajoutée. En revanche, cette solution s'est révélée pertinente pour certaines pièces de moteur en aéronautique et de réacteur pour le spatial. Les projets de R&D sont caractérisés par une obligation de moyen, ce qui signifie que le porteur du projet doit « mettre en œuvre tous les efforts raisonnables et les moyens appropriés pour atteindre un objectif mais sans garantir le résultat. Les acteurs doivent agir avec diligence et compétence, mais ils ne sont pas responsables si le résultat escompté n'est pas atteint, à condition qu'ils aient fait tout leur possible ». La gestion calendaire et des livrables des projets de recherche sont similaires aux projets équipementiers, via les jalons usuels de gestion des projets aéronautiques (KOM, SRR, PDR, CDR, etc...), ou bien en pilotant sur la base de niveaux de TRL. L'objectif de cette deuxième approche est de donner plus de liberté d'action aux concepteurs pour faire monter la maturité du produit, contrairement au management de projet dans l'aéronautique où le design du système sera rapidement figé pour laisser du temps pour les essais de certification ainsi que la préparation de l'ensemble de la chaîne de qualité en perspective de la production série.

Le processus industriel de référence pour le développement de produits reprend les jalons classiquement utilisés pour les projets aéronautiques pour la gestion des projets de R&D. Ce choix est justifié par le fait de répondre à des appels à projets de R&D pour lesquels une entreprise dite de « sponsor » va mettre à disposition ses données techniques, fournissant ainsi un cas applicatif concret, et offrant la perspective de se voir développer un prototype à moindre coût. Les livrables sont dans ce cas-là les rapports techniques du développement ainsi que les prototypes démonstrateurs. Le produit conçu à l'issue du projet est catégorisé comme démonstrateur plutôt que comme un produit mature de série, étant donné qu'il reste en général des problématiques techniques à traiter. Cela induit une maturité technologique du produit et du processus qui se situent entre un TRL 3 et 6. Ainsi, le processus de conception appliqué par Nexteam Group, pour les projets équipementiers comme pour les projets de R&D, reprend la structure du processus de développement recommandé pour le développement de systèmes [58], dont les étapes sont détaillées sur la figure 1.11.

- **Montage du projet** : cette première étape définit le périmètre de tout le projet du point de vue des objectifs financiers, calendaires et techniques. C'est durant cette étape que les premières spécifications seront formulées pour donner les moyens aux concepteurs de proposer des premières solutions techniques répondant à l'appel d'offres. Cette première étape est clôturée par l'acceptation de l'offre, puis par le *kick-off meeting* (KoM) qui lance de pleinement le projet.
- **Définition des concepts** : cette étape consiste à explorer au maximum l'espace des solutions pour identifier les concepts en accord avec les spécifications formalisées, mais également à récupérer un maximum d'informations de la part du client. En effet, il est rare que l'ensemble des spécifications soient formalisées dès le lancement du projet : il s'agit plutôt d'un processus itératif qui va venir enrichir le CdCF à mesure que la maturité du produit avance. Cette phase se termine avec l'*Architecture Review* (AR) qui valide les premiers concepts dont l'étude et le dimensionnement seront approfondis.

## 1.4. IDENTIFICATION DU PROCESSUS INITIAL POUR L'APPLICATION DE LA PROPOSITION

- **Prédimensionnement** : l'étape de prédimensionnement consiste à réaliser les calculs préliminaires pour valider les points de spécification formalisés, par l'intermédiaire d'outils d'ingénieries (mécanique du solide, mécanique des fluides, thermique, modélisations multiphysiques, etc...). Cette étape s'achève sur la *Preliminary Design Review* (PDR), dont le rôle est de valider que les calculs ont été menés correctement, dans le respect des hypothèses et des limitations des méthodes utilisées, afin de figer la majorité du design. Par retour d'expérience, il est admis que le dimensionnement est achevé à 80-90 % à l'issue de la PDR car l'espace des solutions est théoriquement circonscrit et maîtrisé, et les chances d'avoir des modifications majeures sont faibles.

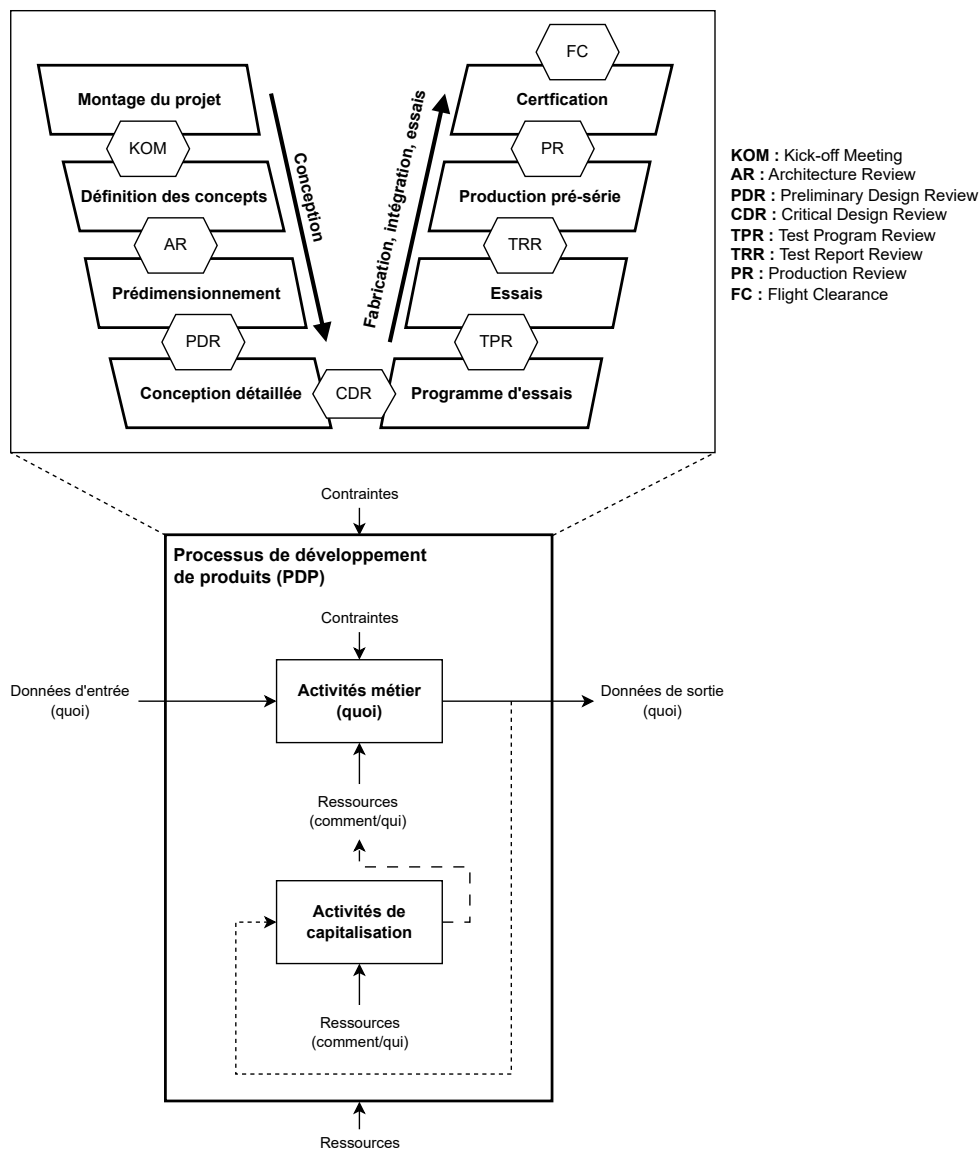


FIGURE 1.11 – Processus de conception aéronautique standard utilisé pour les développements de produits chez Nexteam Group

#### 1.4. IDENTIFICATION DU PROCESSUS INITIAL POUR L'APPLICATION DE LA PROPOSITION

---

- **Conception détaillée** : c'est à cette étape que le produit est finalisé et optimisé - que ce soit la géométrie, le choix des matériaux ou l'ordonnancement de l'assemblage. La mise en plan est également réalisée conjointement avec les choix des procédés de fabrication, les tolérances dimensionnelles qu'on peut espérer obtenir à l'issue de la fabrication étant fortement dépendantes du procédé d'obtention. C'est une fois que l'ensemble des caractéristiques du produit et que le processus de fabrication sont complètement formalisés et gelés que l'ensemble peut être présenté au client lors de la *Critical Design Review* (CDR), qui va marquer la fin du processus de conception, au sens de l'ingénierie pour définir le produit, pour s'orienter vers les essais de validation des produits conçus.
- **Définition du programme d'essais** : l'ensemble des essais à réaliser, nécessaires pour valider la définition du produit, sont finalisés dans un programme d'essais (*Test Program*). Les perspectives d'essais de validation de chaque niveau sont initiées à chaque étape de la branche gauche du cycle en V, mais ne sont finalisées qu'à la définition du programme d'essais. Ce document synthétise les objectifs des essais, les moyens d'essais à utiliser, les conditions de ces essais, l'instrumentation ainsi que les protocoles d'essais à utiliser et les résultats attendus. Il peut être complété avec le moyen de contrôler la qualité de la fabrication des prototypes au préalable de ces essais, ce qui sert à définir un état de référence des pièces avant les essais. Ce document est ensuite présenté et validé par le client lors de la *Test Program Review* (TPR).
- **Essais et rédaction des rapports d'essais** : c'est durant cette période que les essais définis dans le programme d'essais sont réalisés. Il s'agit de valider que les résultats obtenus sont bien conformes aux spécifications du CdCF, et sinon d'arriver à expliquer les sources des écarts. Des essais complémentaires peuvent également être réalisés au besoin. Une fois l'ensemble des essais réalisés et les conclusions validées, les résultats obtenus sont formalisés dans un rapport d'essais, qui est communiqué au client lors de la *Test Report Review* (TRR).
- **Production pré-série et revue de production** : une fois le design complètement validé par la réalisation des essais, une phase de production pré-série est souvent envisagée dans la perspective d'essais sur démonstrateur/appareil, et non plus uniquement sur bancs d'essai. La phase de pré-série est également l'occasion pour le fabricant de monter progressivement sur les cadences de production en fonction des perspectives et de la finalité du projet. La fabrication de pré-séries est également l'opportunité pour le fabricant de contrôler les produits fabriqués pour pouvoir ajuster ses processus de fabrication pour atteindre les définitions souhaitées. La phase s'achève sur l'analyse des résultats obtenus lors de *Production Review* (PR).
- **Certification** : enfin, la dernière perspective du processus de développement de produits dans l'aéronautique est la phase de qualification. L'objectif est de passer les différents essais de certification, souvent réalisés dans des conditions représentatives d'utilisation, par un montage du produit sur appareil par exemple. L'ensemble des résultats sont ensuite présentés aux autorités compétentes, l'*European Union Aviation Safety Agency* (EASA) ou la *Federal Aviation Administration* (FAA) pour respectivement l'Europe et les États-Unis. C'est à l'issue de ce processus de certification que le produit obtient son accréditation *Flight Clearance* (FC) qui l'autorise à être fabriqué et assemblé sur des appareils de série.

## 1.4. IDENTIFICATION DU PROCESSUS INITIAL POUR L'APPLICATION DE LA PROPOSITION

Le PDP aéronautique de référence, tel qu'il est représenté sur la figure 1.11, intègre pleinement les principales phases et jalons techniques tels que requis par [58] ou [59]. Par ailleurs, ces revues techniques de conception sont concordantes avec la norme EN9145 et le référentiel *Advanced Product Quality Planning* (APQP). Dans le cas où il y aurait une perspective de certification, pour des projets équipementiers notamment, ce processus est également en phase avec les normes en vigueur EN9100, EN9102 et EN9145. Chaque phase de développement a des activités clairement définies avec ses enjeux d'ingénierie, des livrables identifiés ainsi que les revues techniques de conception associées (PDR, CDR, TRR, etc...).

### 1.4.2 Le processus de prédimensionnement de Nexteam Group

La figure 1.12 détaille la représentation macroscopique du processus métier de développement produit, qui est basé sur le processus standard aéronautique présenté précédemment en figure 1.11. La phase de « prédimensionnement » est décomposée en activités. Cette phase, située entre les revues AR et PDR, contient des activités de prédimensionnement par calcul, et d'autres activités qui couvrent un ensemble d'autres problématiques à résoudre lors du prédimensionnement (assemblage, fabrication, matériaux, etc...). Les deux types d'activités considérés, de prédimensionnement par calcul et les autres, sont interdépendants et également associés à l'étape de « définition des concepts », en raison du caractère itératif du processus de conception. Les relations sont marquées par des traits continus, tandis que les boucles itératives sont représentées par des traits pointillés.

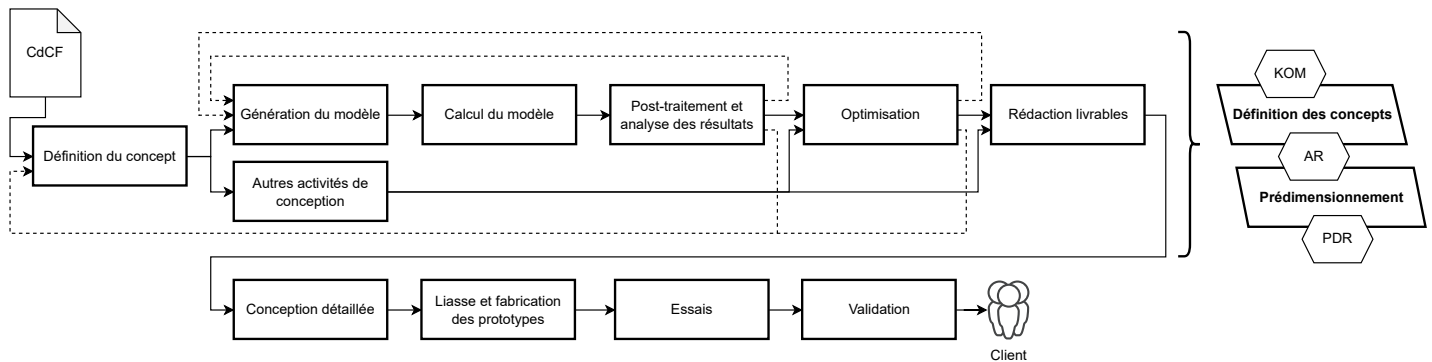


FIGURE 1.12 – Processus métier de développement de produits chez Nexteam Group en vue macroscopique

L'ensemble des activités de prédimensionnement par calcul constitue le sous-processus initial qui sera étudié dans le cadre de ces travaux pour démontrer la mesure de la performance développée. Ce processus se décompose suivant les étapes de « génération du modèle », de « calcul », de « post-traitement et analyse des résultats », d'« optimisation » du produit en cours de dimensionnement et enfin la « rédaction des livrables » (les rapports de conception par exemple) une fois le concept figé et prédimensionné. À l'issue de la rédaction des livrables, la revue de PDR est passée pour acter la continuité du projet ou les corrections à apporter. Le PDP poursuit ensuite sur les étapes de « conception détaillée » et sur les « essais » dans la logique du diagramme figure 1.11. Le processus de « validation », qui apporte la conclusion sur les travaux menés avec les différents livrables requis, est une conclusion

## 1.4. IDENTIFICATION DU PROCESSUS INITIAL POUR L'APPLICATION DE LA PROPOSITION

---

possible du PDP parmi plusieurs, en fonction du type de projet (développement d'équipement, R&D, autre). Les projets équipementiers se ponctuent généralement sur des essais complémentaires représentatifs ainsi qu'une phase de certification qui n'est pas abordée dans le cadre de cette étude. Dans notre cas, les essais apportent les conclusions sur le niveau de maturité TRL du produit réalisé, et cela guidera ensuite les concepteurs sur la définition des objectifs de futurs projets pour poursuivre le développement technologique d'un produit.

Les revues d'avancement sont réalisées suivant les découpages prévus du PDP, avec la PDR à l'issue du processus de prédimensionnement, puis la CDR à l'issue de la conception détaillée, etc... Dans le cas des activités concernées par notre étude, la revue de conception AR peut être validée avant le processus de prédimensionnement, à l'issue du choix des concepts présenté sur la figure 1.12, dans le cas où le concept technique est figé et validé avec le client. Une deuxième possibilité est de valider la revue AR durant le processus itératif de définition des concepts et du prédimensionnement, après l'exploration et l'étude de différents concepts techniques.

Le processus de prédimensionnement décrit dans la figure 1.12 est détaillé sur la figure 1.13 suivant la convention IDEF0. Ce PDP, focalisé sur le prédimensionnement de produits, constitue le processus initial (*as-is*) de notre étude, c'est-à-dire l'état de référence qui sert à valider la proposition de ces travaux de thèse. Ce processus sera comparé à celui qui intègre les propositions scientifiques (*to-be*) pour valider les apports scientifiques de ces travaux. Nous reviendrons plus en détail, dans la section 1.6, sur les dénominations de ces processus. Le détail des activités de la figure 1.13 est présenté en suivant :

- La génération du modèle est l'étape durant laquelle le concepteur construit le modèle d'ingénierie qui lui donnera les résultats pour analyser le concept étudié. Les modèles analytiques dérivent des théories des sciences de l'ingénieur (mécanique, fluide, thermique, etc...) et sont initialement développés sous une forme analytique, par exemple sous forme d'équations aux dérivées partielles, pour répondre à des cas applicatifs simples basés sur certaines hypothèses. Ces approches analytiques aident à comprendre les phénomènes fondamentaux, et à trouver des solutions approximatives dans des contextes où les conditions sont idéalement simplifiées. Cependant, pour des modélisations plus complexes où la précision est cruciale, les modèles par EF (Éléments Finis) sont utilisés. Ces modèles réduisent les approximations faites sur la géométrie et les conditions aux limites des systèmes étudiés. En divisant l'objet étudié en éléments plus petits, et en résolvant les équations sur chacun de ces éléments, les EF offrent des résultats plus précis. Les modèles analytiques offrent donc une base théorique solide et des solutions rapides pour des cas simples, tandis que les modèles par EF retranscrivent la complexité réelle des produits modélisés, assurant ainsi des solutions plus optimisées pour les spécifications demandées.
- Le calcul du modèle est l'étape de résolution du modèle pour obtenir en résultat des données, qui seront exploitées dans la prochaine activité. La durée de l'étape de calcul est variable : elle peut être très rapide dans le cas d'une résolution de formules analytiques sur un tableur, ou bien prendre plusieurs minutes à plusieurs heures (et même jours) pour des calculs par EF. Le temps de résolution d'un calcul EF dépend du niveau de discrétisation du problème et des méthodes de résolution (itératives ou directes). La précision et la stabilité des solutions obtenues dépendent également de la qualité du maillage et des algorithmes de résolution utilisés.

## 1.4. IDENTIFICATION DU PROCESSUS INITIAL POUR L'APPLICATION DE LA PROPOSITION

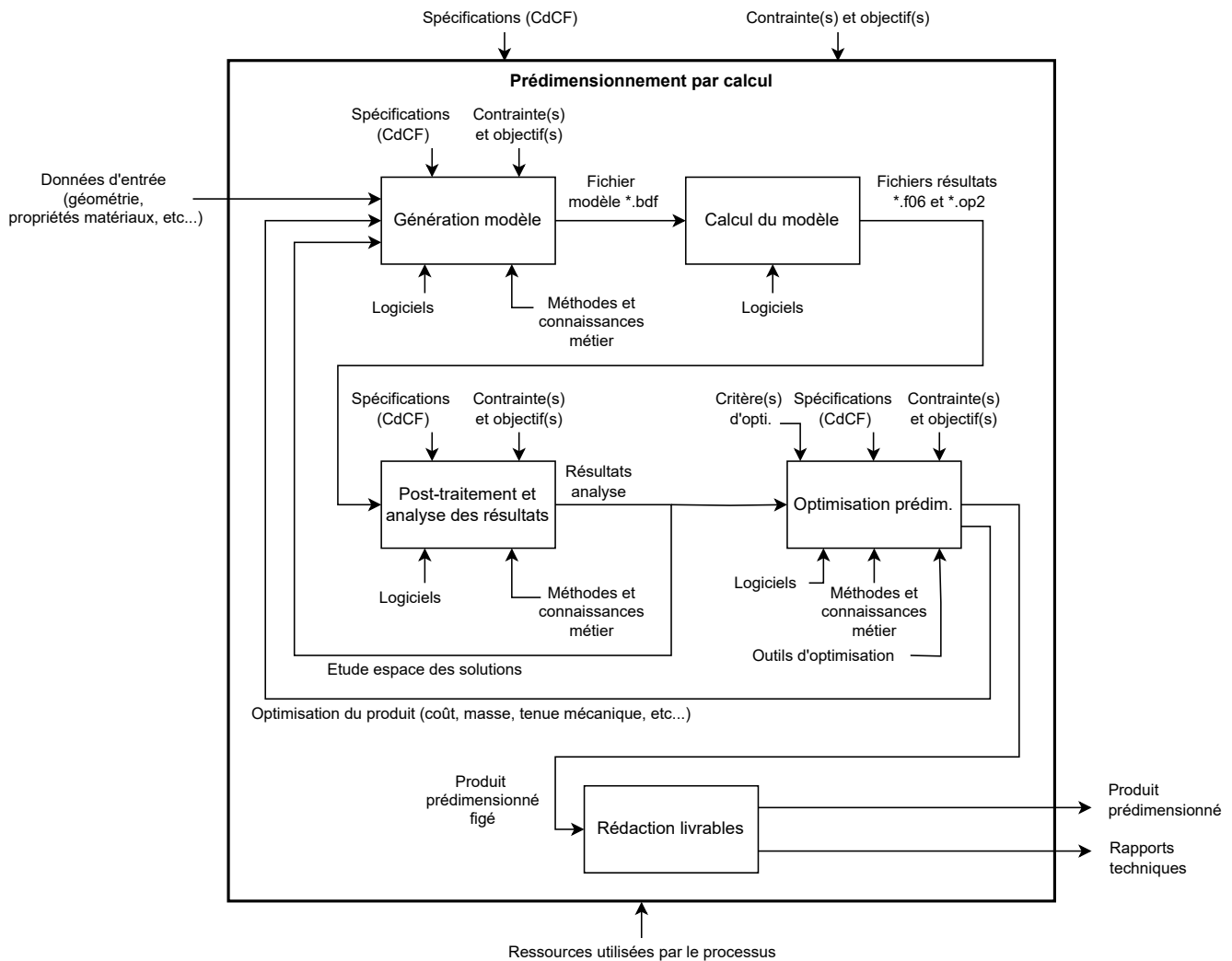


FIGURE 1.13 – Représentation IDEF0 du sous-processus de prédimensionnement initial chez Nexteam Group

- Le post-traitement et l'analyse des résultats sont des étapes critiques dans le processus de prédimensionnement. Dans un premier temps, cette étape consiste à traiter les données obtenues pour aider, dans un deuxième temps, les concepteurs à tirer des conclusions sur l'étude en cours. Ces activités font appel aux connaissances d'ingénierie des concepteurs, pour analyser les résultats obtenus d'une part, mais également pour orienter les choix techniques lors des futures itérations. Dans le cas où le produit ne respecte pas toutes les spécifications du CdCF, le concepteur décide des paramètres à faire varier dans l'espace des solutions pour orienter le produit vers une solution technique valide. Une fois l'ensemble des contraintes respectées, le processus peut se poursuivre avec l'optimisation.
- L'optimisation du prédimensionnement est une activité dont l'enjeu est d'orienter les choix techniques pour améliorer le produit prédimensionné par rapport à un ou plusieurs points du

#### 1.4. IDENTIFICATION DU PROCESSUS INITIAL POUR L'APPLICATION DE LA PROPOSITION

---

CdCF. L'« optimisation » est, dans ce manuscrit, à considérer comme le processus itératif qui consiste à faire varier des paramètres pour améliorer les performances du produit par rapport aux spécifications, à la masse et/ou aux coûts. Ce processus n'aboutit pas nécessairement sur un optimum, au sens mathématique du terme, mais à un produit dont les caractéristiques sont améliorées jusqu'à un niveau jugé satisfaisant par le concepteur. Il existe plusieurs critères d'optimisation de produits mais, dans le secteur aéronautique, le produit est généralement optimisé sur les critères du coût de production, de la masse et/ou de la tenue mécanique.

- La rédaction d'un rapport technique de prédimensionnement est l'ultime étape du processus de prédimensionnement. Ce rapport reprend l'ensemble des éléments justificatifs de la conception comme les modèles utilisés, les hypothèses, les données ainsi que les résultats pour d'une part capitaliser ce qui a été fait, mais également pour justifier les résultats obtenus auprès du client ou des autorités compétentes.

Le processus de prédimensionnement étant maintenant décrit dans son ensemble, les activités de conception propres au PDP de Nexteam Group vont être présentées. Il s'agit d'étudier le cas du prédimensionnement de lignes et d'arbres de transmission en composite. Ces activités s'intègrent dans un contexte de développement industriel de R&D, et le PDP présenté a vocation à servir de cas illustratif pour ces travaux.

## 1.5 Les activités de conception de Nexteam Group

Pour approfondir la présentation de la figure 1.13, les activités du « processus de prédimensionnement » sont détaillées dans cette section. On retrouve dans ces activités les principales tâches que les concepteurs réalisent pour passer d'un CdCF à un produit prédimensionné. Le PDP étudié dans ces travaux de recherche concerne le développement d'arbres de transmission en composite, qui s'intègrent dans une ligne de transmission arrière d'hélicoptère, ou d'autres aéronefs comme les appareils convertibles de type rotors basculants (*tiltrotor*). La transmission arrière d'un hélicoptère, illustrée par la figure 1.14 extraite du rapport d'analyse de la sécurité des transports du Canada [60], est un organe mécanique qui sert à transmettre le couple de la boîte de transmission principale (BTP), elle-même directement couplée à la turbine qui motorise l'aéronef, à la boîte de transmission intermédiaire (BTI). Les lignes de transmission ont pour objectif de transmettre la puissance de la turbine jusqu'au rotor arrière, aussi appelé rotor anti-couple, dont la fonction est de piloter la rotation de l'aéronef sur lui-même.

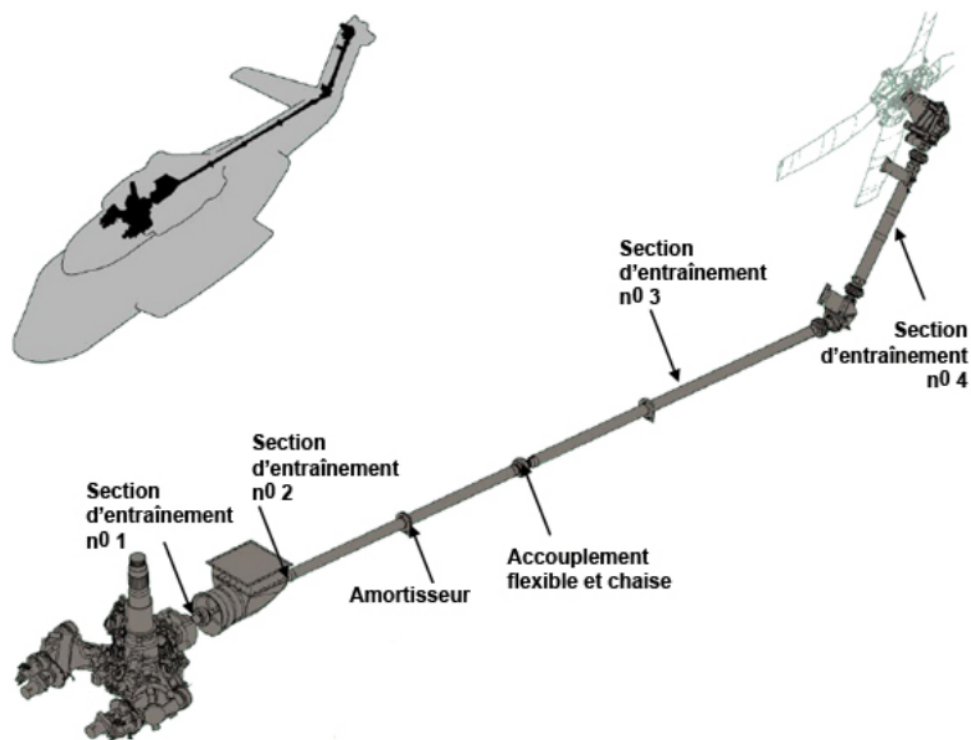


FIGURE 1.14 – Exemple d'architecture de transmission arrière d'hélicoptère SIKORSKY S-92A (extrait de [60])

La ligne de transmission est généralement constituée de trois composants principaux : les arbres de transmission, les supports et les accouplements flexibles. À titre d'information, d'autres composants peuvent être intégrés à la ligne en fonction des besoins ou technologies retenues, comme des pièces d'interface à crabot ou cannelées. Quelques exemples de ces composants sont donnés sur la figure 1.15, dont certaines illustrations sont extraites des travaux de Géromin [61], et d'autres sont issues des travaux propres à l'entreprise Nexteam Group. Les trois composants principaux sont détaillés en suivant :

## 1.5. LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION DE NEXTEAM GROUP

- Les arbres de transmission sont utilisés pour transmettre la puissance sur la distance. Ils sont constitués d'une longue section tubulaire sur laquelle sont fixées des interfaces de part et d'autre des extrémités. Ces interfaces sont généralement des brides, qui seront vissées aux interfaces des organes moteurs et récepteurs, ou des cannelures, accouplées avec les organes annexes. D'autres technologies sont plus rarement employées, comme les transmissions par crabots par exemple.
- Les supports sont les pièces qui relient la ligne de transmission à la structure de l'aéronef. La rotation des arbres est permise par l'utilisation de roulements à billes ou de paliers à l'interface entre les arbres et les supports.
- Les accouplements flexibles sont des produits intégrés pour compenser les désalignements de la structure, la flexion de la poutre de queue dans le cas d'un hélicoptère. Les arbres, dont leurs interfaces, ne sont généralement pas dimensionnés pour des chargements de flexion, et c'est donc le rôle des accouplements. Ce type de pièce est placé entre les interfaces du support et de l'arbre de transmission pour absorber le désalignement angulaire et/ou radial entre les différents composants.

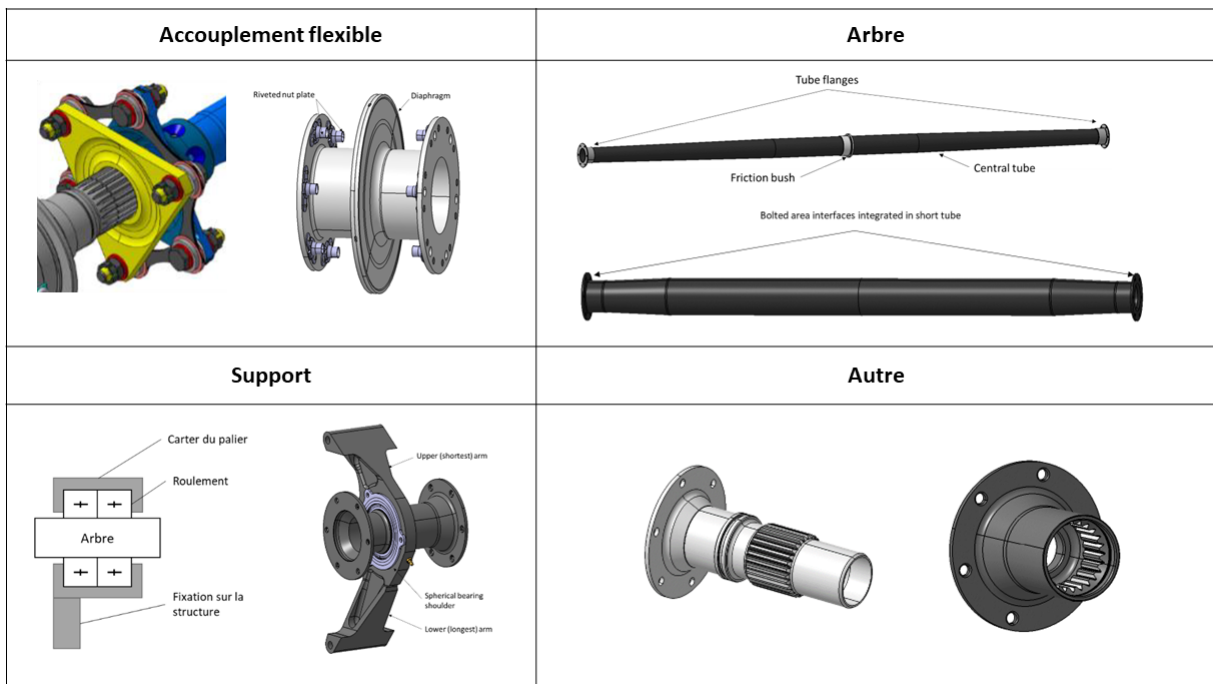
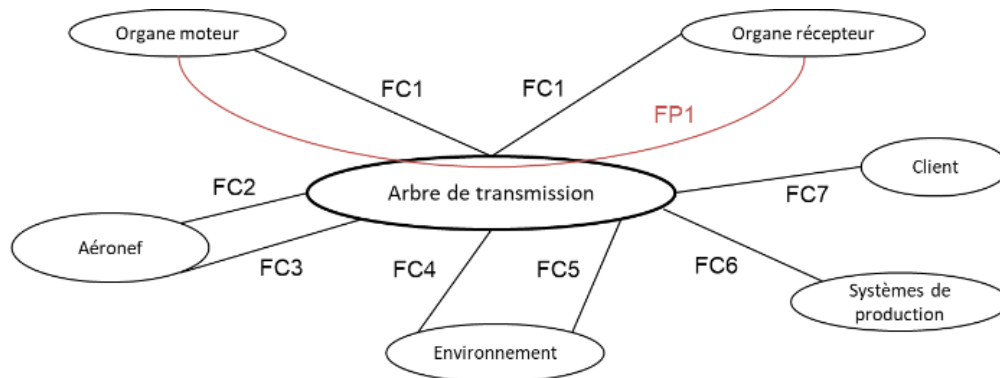


FIGURE 1.15 – Exemples de composants d'une transmission arrière d'hélicoptère (dont certains extraits de [61])

La ligne de transmission de puissance, incluant tous ses composants, doit être la plus légère possible pour limiter la masse embarquée de l'aéronef. C'est pour cela que le développement d'arbres de transmission en composite est au cœur de la stratégie de R&D de l'entreprise Nexteam Group.

## 1.5. LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION DE NEXTEAM GROUP

L'objectif est d'être capable de fournir des arbres à la fois plus légers, mais également moins chers à fabriquer que leurs équivalents métalliques. Pour parvenir à proposer ces arbres, il faut être capable de les dimensionner en fonction des spécifications de l'appareil dans lequel ils seront intégrés. Pour cela, l'étude des différentes fonctions contraintes à respecter avait été réalisée par Géromin [61] dans le cadre d'une thèse précédant les travaux actuels. Les travaux de Géromin étaient axés sur le développement d'arbres courts et flexibles métalliques, qui s'interfaçent entre la turbine et la BTP, ce qui est un cas de figure différent du développement d'une ligne de transmission, entre la BTP et la BTI [62]. Les fonctions principales et contraintes sont toutefois similaires dans les deux cas de figure. Nous nous appuyons donc sur le diagramme pieuvre de la figure 1.16, présenté dans [61], pour identifier la fonction principale et les fonctions contraintes que doit respecter un arbre de transmission. La seule différence notable entre un arbre flexible et un arbre dans une ligne de transmission, sur la figure 1.16, est la fonction contrainte « FC1 : admettre un désalignement sans introduire de perturbation ». Dans le premier cas, c'est l'arbre qui absorbe directement les désalignements, tandis que pour le cas de la ligne de transmission, les accouplements flexibles sont chargés de récupérer ces déformations. Finalement, les fonctions principales et contraintes sont identiques à l'échelle des systèmes, mais présentent une légère différence à l'échelle de l'arbre de transmission.



- FP1 : Transmettre la puissance mécanique de l'organe moteur vers l'organe récepteur.  
FC1 : Admettre un désalignement sans introduire de perturbation.  
FC2 : Garantir un comportement vibratoire conforme avec le spectre de fonctionnement.  
FC3 : Ne pas présenter d'instabilité mécanique sur le spectre de fonctionnement.  
FC4 : Respecter les limites d'encombrement.  
FC5 : Minimiser la masse de l'arbre de transmission.  
FC6 : Être fabricable et industrialisable.  
FC7 : Être compétitif et performant sur les exigences du client.

FIGURE 1.16 – Analyse fonctionnelle d'un arbre de transmission (extrait de [61])

De cette analyse fonctionnelle sont extraites les deux fonctions qui sont utilisées pour notre cas d'étude illustratif : FP1 et FC2. Les autres fonctions contraintes ne seront pas traitées dans le cadre de ces travaux. La présentation des fonctions est réalisée en suivant :

- **FP1 : transmettre la puissance mécanique de l'organe moteur vers l'organe récepteur.** Les concepteurs répondent à cette fonction principale par le calcul et l'analyse des contraintes obtenues pour un chargement en torsion, possiblement combiné à d'autres chargements. Les

objectifs de cette activité sont d'identifier les zones de concentration des contraintes d'une part, mais également de quantifier cette contrainte en fonction de la géométrie de l'arbre de transmission, du chargement et des conditions limites, des propriétés du matériau utilisé d'autre part, pour la comparer aux contraintes admissibles du matériau utilisé. L'analyse de cette contrainte se fait au regard des différents cas de chargement de l'appareil sur l'arbre de transmission, généralement répartis en des cas de chargement statique et des cas de chargement dynamique. Dans le deuxième cas, les chargements ont une caractéristique cyclique, et le calcul doit renseigner sur la durée de vie estimée du produit, quantifiée en heures de vol, par rapport au(x) spectre(s) de chargement énoncé(s) dans les spécifications.

- **FC2 : garantir un comportement vibratoire conforme avec le spectre de fonctionnement.** Les concepteurs abordent cette fonction contrainte par le calcul et l'analyse des modes propres en flexion, et parfois axiaux, de la ligne de transmission mécanique. L'étude des modes propres en flexion est favorisée car c'est le type de résonance qui est le plus à même d'apparaître liée à l'excitation du balourd en rotation. L'objectif de cette activité est de calculer les valeurs des fréquences propres et d'identifier le type des modes propres de la ligne de transmission. Ces résultats sont comparés aux plages de fréquences interdites, les plages opérationnelles de l'appareil, qui sont renseignées dans les spécifications.

### 1.5.1 Le calcul des contraintes de torsion

Le calcul des contraintes qui s'exercent sur un arbre de transmission, soumis à un chargement de torsion, est une activité centrale dans le PDP d'arbres de transmission en composite. La bonne résolution de cette activité est primordiale pour répondre à la FP1 de la figure 1.16 : assurer la transmission de la puissance mécanique entre un organe moteur et un organe récepteur. La mise en perspective des contraintes relevées avec les admissibles des matériaux aide les concepteurs à déterminer si le concept d'arbre étudié respecte les contraintes du CdCF. La complexité de cette activité augmente avec l'utilisation de matériaux composites, par rapport aux études basées sur des matériaux métalliques. En effet, la définition d'un matériau composite requiert une plus grande quantité de propriétés matériaux ainsi que la définition des séquences d'empilement. En plus de la spécification des propriétés du concept d'arbre, les concepteurs doivent également arbitrer parmi une multitude de critères de rupture (Tsai-Hill, Tsai-Wu, Hashin, Max Stress, Yamada-Sun, Puck, LaRC05, et d'autres...) [63] comparativement aux critères de rupture des matériaux métalliques (Tresca, Von Mises). Cette augmentation croissante de la complexité à modéliser un arbre de transmission composite rend le besoin en connaissances préalables plus important, et accentue la nécessité d'intégrer des outils de capitalisation des connaissances pour ce type de tâche. La modélisation de l'arbre composite, qu'elle soit sur une base analytique ou par EF, est une étape importante pour fournir aux concepteurs des données de sortie fiables, ce qui induit qu'elle doit respecter les règles métier définies par les méthodes.

Au sein de l'entreprise Nexteam Group, plusieurs approches sont utilisées lorsqu'il s'agit de déterminer la tenue en torsion d'un arbre composite, pour répondre à la FP1. La première consiste à utiliser la théorie de la mécanique, donc une approche analytique basée sur la mécanique des solides déformables, qui est implémentée dans un outil de type tableur. Cette approche offre une modélisation et des résultats rapides, mais se révèle assez limitée dans l'éventail des résultats fournis, que ce soit au

niveau de la définition de l'arbre ou des zones d'analyse de la contrainte sur l'arbre. Une autre approche consiste à utiliser une modélisation par EF 2D, présentée en exemple sur la figure 1.17, en modélisant l'arbre comme une surface car l'épaisseur est négligeable par rapport aux autres dimensions de l'arbre. Cette méthode offre un bon compromis entre temps de modélisation, temps de calcul et précision des résultats. Elle est cependant plus difficile à mettre en œuvre que la solution précédente. De plus, le concepteur doit être formé sur la méthode de modélisation d'une part, ainsi que sur les méthodes de post-traitement et d'analyse des résultats. Enfin, une troisième approche est utilisée pour obtenir des résultats raffinés sur une zone spécifique. La modélisation par EF est faite avec des éléments 3D pour offrir plus de précision sur le flux de contraintes qui traverse l'arbre. L'utilisation d'une modélisation 3D nécessite de nouvelles données supplémentaires en entrée, ce qui constitue un frein lors d'une étape de prédimensionnement où les données sont en général incomplètes. Les résultats sont également obtenus au prix d'un temps de modélisation et de calcul plus important.

Les activités focalisées sur l'analyse des contraintes en torsion d'un arbre composite s'intègrent dans le processus métier de prédimensionnement décrit en figure 1.13. Les concepteurs ont à leur disposition plusieurs outils pour réaliser les activités de conception : tableurs (implémentation d'approches analytiques), modélisation par EF 2D et/ou 3D. Le choix de l'outil à utiliser, la ressource de l'activité, est conditionné par les contraintes de temps, de coût, de fidélité ou encore de praticité, et il est réalisé par le concepteur arbitrairement en fonction de ses connaissances propres. Le choix des outils utilisés impacte la performance du PDP, intuition qui est confirmée par le retour d'expérience des concepteurs, par exemple en fonction des logiciels ou méthodes utilisés. C'est pourquoi nous aborderons dans notre étude les indicateurs qui font le lien entre les critères de choix des outils et les performances mesurées. Un enjeu de ces travaux est d'apporter des outils pour, d'une part, aider à choisir un outil adapté à la réalisation d'une tâche (ici, le calcul des contraintes de torsion) et, d'autre part, être capable d'apporter les connaissances utiles aux concepteurs par la réutilisation des connaissances métier capitalisées lors des précédentes réalisations.

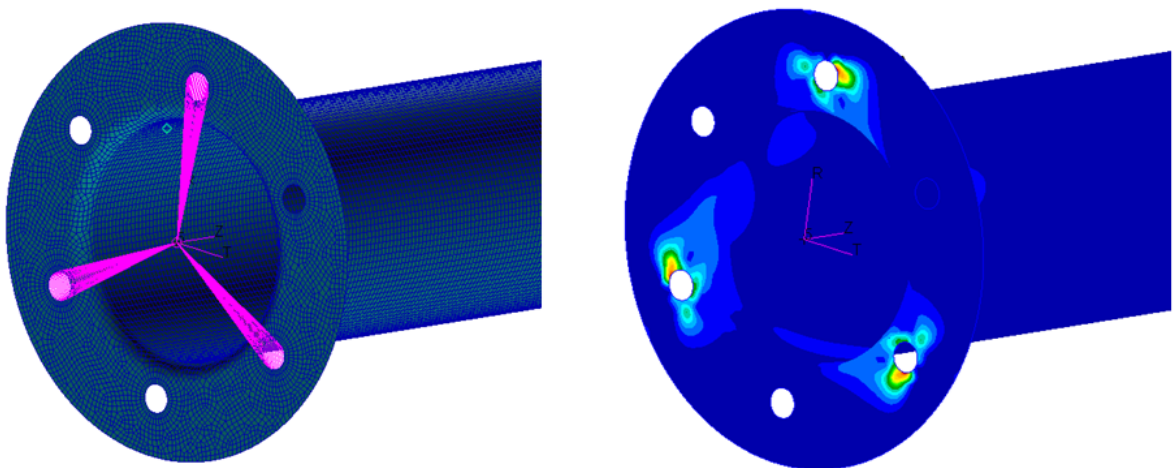


FIGURE 1.17 – Exemple de la modélisation et du calcul des contraintes en torsion d'un arbre composite

### 1.5.2 Le calcul des fréquences

Le positionnement fréquentiel d'une ligne de transmission représente un véritable challenge pour les concepteurs à cause des couplages entre les différents composants [64], qui impactent le comportement fréquentiel global de la ligne. Dans la majorité des cas, assurer le bon positionnement fréquentiel de la ligne de transmission est une des contraintes de conception les plus critiques et dimensionnantes de ce système, d'où la présence en tant que fonction contrainte (FC2) sur la figure 1.16. Les fréquences propres sont recherchées car elles déterminent des points de résonance de la ligne de transmission, et qui seront excités par n'importe quelle sollicitation extérieure (balourd, désalignement, composant voisin, etc...). L'entrée en résonance, qui plus est si elle est couplée à une excitation extérieure, entraîne un niveau vibratoire élevé susceptible de dégrader la tenue des composants de la ligne de transmission, dont les conséquences peuvent être catastrophiques pour l'appareil en vol. De ce fait, la ligne de transmission est qualifiée de système « critique » pour un hélicoptère : la défaillance de ce système met en péril l'intégrité de l'aéronef.

Il existe différentes méthodes pour déterminer les fréquences propres d'une ligne de transmission. Ces approches découlent de la théorie de l'analyse vibratoire, une branche de la théorie mécanique. L'analyse analytique se base sur une modélisation de l'arbre sous forme de poutre pour réaliser le calcul des fréquences propres [64, 65]. Dans le cadre d'un système en rotation, plusieurs approches existent pour identifier les fréquences et modes propres du système : le calcul des modes normaux, le calcul des modes complexes et le tracé du diagramme de Campbell pour les systèmes en rotation (qui correspond à une analyse des modes complexes sur plusieurs fréquences) ou encore l'analyse des réponses fréquentielle et transitoire et autres solutions non-linéaires. Plus de détails sur l'implémentation de ces méthodes sont accessibles dans les manuels de référence comme [66, 67]. Le calcul des modes normaux est l'approche la plus simple du point de vue de la modélisation car elle néglige la composante liée à l'amortissement et aux efforts extérieurs. Elle consiste donc à déterminer la fréquence propre et la forme du mode de vibration en considérant uniquement les masses et les raideurs du système. Ce calcul fournit une première indication sur le positionnement des fréquences propres du système, donc les fréquences qui seraient excitées par une sollicitation dynamique comme le balourd. En effet, le positionnement réel des fréquences propres d'un système tournant en fonctionnement est susceptible de dévier par rapport aux fréquences du système en rotation à cause de l'amortissement ainsi que de la vitesse de rotation, d'où l'utilisation des diagrammes de Campbell en complément de ces premiers résultats. L'obtention des fréquences propres se fait par la résolution de l'équation réduite du mouvement, sans amortissement, suivante [66] :

$$[M] \{\ddot{u}\} + [K] \{u\} = 0 \quad \text{avec} \quad \{u\} = \{\phi\} \sin \omega t$$

L'analyse du comportement fréquentiel de la ligne de transmission est réalisée par différentes méthodes dans l'entreprise Nexteam Group. La première est par l'utilisation d'un tableur pour le calcul des fréquences propres d'une poutre en flexion. Cet outil fournit un résultat rapide mais relativement peu précis et fidèle dès lors que les conditions limites ne sont plus considérées comme idéales ou que la géométrie s'éloigne d'une poutre de section constante. Dans ce cas, la modélisation par EF devient l'outil favorisé pour réduire les imprécisions. La modélisation par EF 1D permet de modéliser une large variété de géométries et de conditions aux limites, tout en nécessitant que peu de temps. Les résultats sont plus fidèles qu'avec l'approche analytique, mais l'incertitude sur les résultats obtenus peut être importante en fonction des cas à cause de la multiplication des simplifications. Cette approche n'est

pas favorisée car les calculateurs travaillent de pair avec les concepteurs-dessinateurs, et préfèrent donc en général travailler sur des modélisations 3D des produits (via des fichiers STEP \*.stp). Cela induit que les calculs des fréquences propres sont réalisés sur la base de modélisation EF 2D et 3D, voir exemple sur la figure 1.18. Par cette approche, la précision et fidélité des résultats sont améliorées mais au détriment de l'augmentation du temps de modélisation et de la complexité de modélisation.

Tout comme pour l'activité de calcul des contraintes de torsion d'un arbre composite, présenté précédemment, plusieurs outils et méthodes sont à disposition des concepteurs pour réaliser le calcul des fréquences propres d'une ligne de transmission. Il a été observé que les concepteurs ont choisi une approche pour le calcul des fréquences propres en lien avec les autres activités de conception, en particulier la modélisation CAO (Conception Assistée par Ordinateur ou *Computer-Aided Design*) des produits. Ce choix n'est pas nécessairement optimal pour la performance du PDP, ce qui restera à démontrer à l'issue de ces travaux. Une des limites évidentes de l'approche est l'absence de réutilisation des connaissances métier, puisque les outils utilisés obligent les concepteurs à réaliser une nouvelle CAO et de nouveaux modèles EF à chaque nouveau projet, ce qui n'offre pas de perspectives de gains de performance sur le long terme.

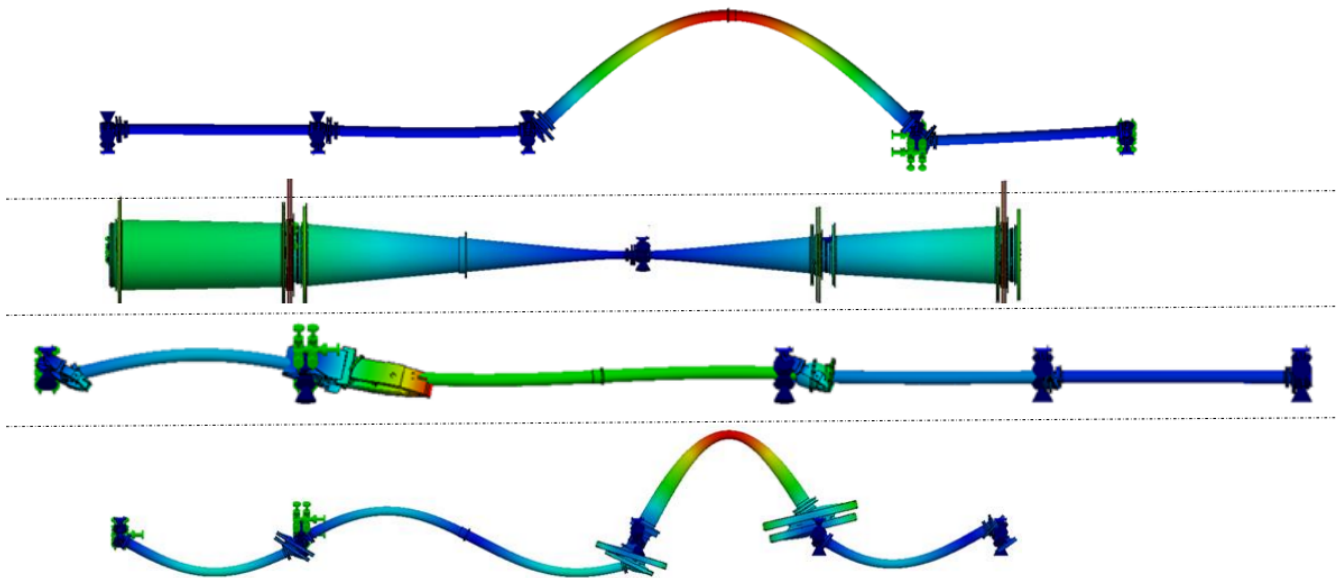


FIGURE 1.18 – Exemple du calcul des modes propres d'une ligne de transmission

### 1.5.3 Autres activités de conception

Au-delà du processus de prédimensionnement par calcul, tel que présenté par la figure 1.13, plusieurs autres activités viennent enrichir le PDP présenté figure 1.12 dans le bloc « Autres activités de conception ». Cette sous-section a vocation à présenter succinctement des activités récurrentes dans le PDP d'arbres en composite et de lignes de transmission.

## 1.5. LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION DE NEXTEAM GROUP

---

Le premier lot d'activités regroupe les modélisations, principalement avec les outils de CAO, des produits, équipements et outillages nécessaires à la conception. Les modélisations CAO versionnées du produit, qui évoluent à mesure que les concepts montent en maturité, servent de base pour étudier tous les aspects du développement du produit : assemblage, maintenance, interférences avec d'autres pièces, calcul, définition des équipements, définition des outillages et moyens de production associés, etc... Les activités qui reposent sur la représentation CAO de la pièce sont nombreuses. Ces travaux se concentrent plus sur l'aspect calcul et prédimensionnement d'un produit ce qui, comme cela vient d'être énoncé, néglige plusieurs activités annexes du PDP.

Le deuxième lot concerne les activités de calcul pour le prédimensionnement du produit, mais qui ne seront pas détaillées dans ces travaux par souci de simplification du PDP. Ces calculs recouvrent notamment l'analyse du couple critique de flambage en torsion de l'arbre, qui doit être supérieur au couple ultime à transmettre par le produit durant son utilisation sur appareil. Des calculs de fréquences propres dans différentes configurations de conditions aux limites, notamment avec des montages sur bancs d'essai ou en libre-libre sont fréquents pour la corrélation de résultats. Les calculs et dimensionnements en fatigue et tenue à l'impact sont également deux activités importantes dans la définition du produit final, notamment pour garantir la tenue mécanique de ce composant critique. Enfin, des activités de calcul sur les composants annexes, en lien avec le troisième et dernier lot d'activités, sont fréquemment réalisées. Ces activités recouvrent la modélisation et l'analyse de coupons de tests unitaires pour corréler les résultats et valider des données qui seront réutilisées pour l'étude de l'arbre de transmission.

Finalement, comme énoncé, le troisième lot concerne l'implémentation d'essais pour acquérir de la donnée et/ou valider des concepts en l'absence d'outils numériques suffisamment fiables. Les premiers essais sont généralement réalisés sur des spécimens coupons, normalisés, pour obtenir des données et corréler les premiers modèles. Ces activités sont récurrentes à chaque projet et les définitions des éprouvettes, étant définies selon des normes, peuvent être réutilisées d'un projet à un autre sans modifications majeures. Viennent ensuite les essais sur des concepts ou prototypes, généralement pour valider des points de spécifications qui ne peuvent l'être par calcul. Ces points de mesure constituent des premières données pour ensuite développer de nouveaux modèles ou de nouvelles méthodes de dimensionnement. L'inconvénient de cette approche est son coût élevé lié à la fabrication des prototypes et au coût de mise en œuvre des essais [68]. Cela rend le besoin de capitaliser les données du PDP encore plus important pour parvenir à améliorer la performance développée, dans l'objectif de ne réaliser plus que les essais qui sont absolument nécessaires et en limitant les points de mesure.

## 1.6 Validation des recherches en sciences de la conception

Il faut attendre la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle pour que la « conception » soit abordée comme un champ de recherche [69, 50, 6]. Face à un manque d'harmonisation autour de la terminologie, des méthodes d'évaluation et des méthodes de recherche en sciences de la conception, Blessing et Chakrabarti publient le livre référence [6] pour initier la formalisation d'un cadre commun pour cette discipline. Cet ouvrage fait suite à leurs travaux préliminaires dont [70, 71], et présente la DRM, soit une « méthode de recherche en conception ». En effet, sans des outils et un cadre de réflexion commun, chacun propose une approche qui lui est propre mais qu'il n'est pas possible de relier à l'existant. Unifier les terminologies et les modèles, cartographier les approches et identifier les points d'accord et de désaccord, comprendre et justifier quelle approche est la meilleure en fonction d'une situation donnée, ou encore comprendre les différences entre les différentes communautés des sciences de la conception, afin de faciliter la création de relations entre les différentes approches, sont autant de challenges à surmonter pour construire un champ de recherche en sciences de la conception [72, 73]. L'objectif des sciences de la conception est de « supporter l'industrie en développant la connaissance, les méthodes et les outils qui permettent d'augmenter les chances de développer un produit avec succès » selon [74, 73]. C'est donc la manière dont les sciences de la conception fournissent ce support, pour améliorer les chances d'un bon développement, qui doit être évaluée par des indicateurs adaptés. Autrement dit, la recherche en sciences de la conception consiste à améliorer la compréhension des phénomènes associés à la conception puis, sur la base de cette analyse, être capable de fournir des recommandations sur les approches, les méthodes, les outils ou les consignes pour améliorer les pratiques de conception [75].

Contrairement aux processus (de conception) industriels, où la performance sera généralement mesurée à travers l'image de la performance du produit comparativement aux spécifications du CdCF, la DRM propose de mesurer la performance du processus dans sa globalité. L'approche inclut également les activités, les méthodes ou encore les outils utilisés. Cette formalisation de la méthodologie de conception a deux objectifs principaux :

- Formuler et valider les modèles et théories en œuvre lors du processus de conception ;
- Développer et valider des méthodes, outils, connaissances permettant d'améliorer la capacité à développer un produit performant.

La DRM est constituée de 4 étapes, voir la figure 1.19, issue de [6] :

- **Clarification de la recherche.** Cette étape vise à clarifier les objectifs de la recherche. Il s'agit d'identifier le problème, de définir l'objectif de la recherche et d'identifier les connaissances pré-existantes. Elle inclut également l'analyse des résultats attendus et l'identification des critères de réussite de la recherche. Cette étape est réalisée à travers les chapitres 1 (la définition du contexte de recherche) et 2 (l'analyse de l'état de l'art) du manuscrit.
- **Première étude descriptive.** Cette étape consiste à étudier la situation actuelle, c'est-à-dire à comprendre les phénomènes existants. Cela inclut la collecte de données empiriques ou l'analyse

de la littérature pour identifier les lacunes et les opportunités d'amélioration dans la pratique actuelle. L'objectif est de développer une compréhension approfondie des problèmes ou des défis dans le contexte étudié. Cette étape correspond également au chapitre 2.

- **Étude prescriptive.** Après avoir clarifié le problème et la situation actuelle, cette étape consiste à développer des solutions ou des interventions pour résoudre les problèmes identifiés. Elle implique la création de modèles, de méthodes ou d'outils qui permettent d'améliorer la pratique de conception. L'idée est de formuler une solution basée sur les résultats des phases précédentes. Les propositions apportées par le chapitre 3 répondent aux attentes de cette étape.
- **Deuxième étude descriptive.** La dernière étape consiste à évaluer si les solutions proposées et développées améliorent effectivement la situation. Cette évaluation peut se faire à travers des expériences, des études de cas ou des simulations, et les résultats permettent de valider ou d'affiner les recommandations. Enfin, le chapitre 4 applique les propositions du chapitre 3 pour évaluer les apports. L'évaluation se fait à travers la comparaison de deux processus de conception, le processus initial *as-is* et le processus final *to-be*. Nous reviendrons plus en détail sur ces termes dans les prochaines pages.

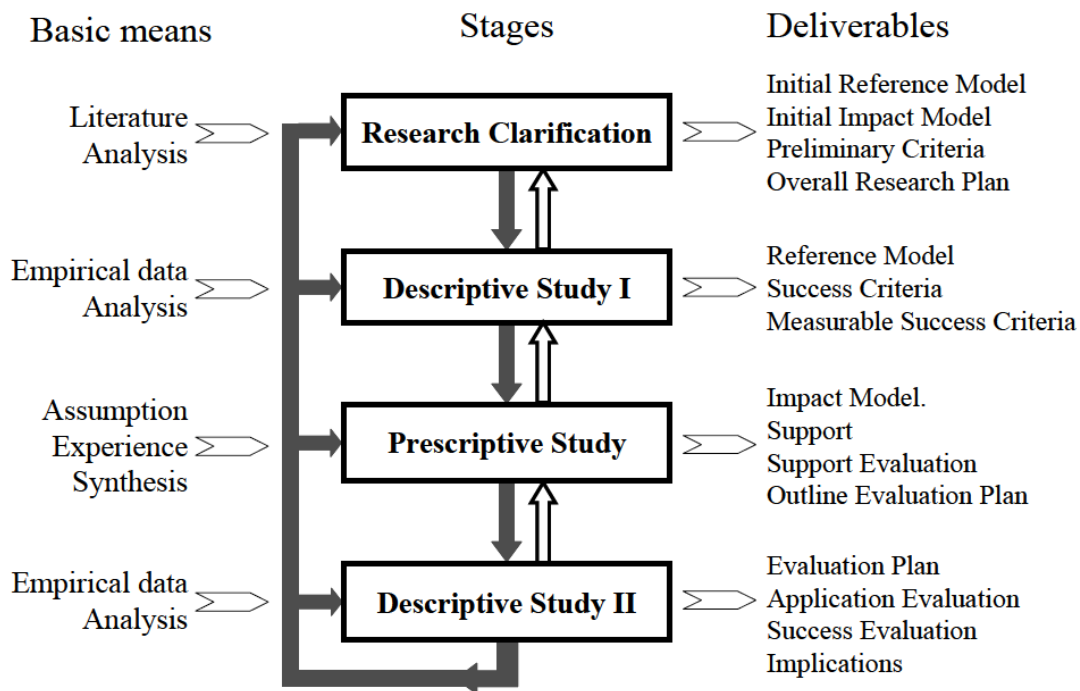


FIGURE 1.19 – Structure du DRM (extrait de [74])

Malgré les efforts fournis pour définir un cadre rigoureux à la conception et au développement, [76] constatent que dans la pratique la proposition de DRM n'est pas, ou peu, appliquée. Ils pointent également l'intérêt et le besoin d'avoir un cadre formalisé et rigoureux pour la conception, mais soulignent que le transfert de ces méthodes du monde académique vers l'industrie reste limité. Cela peut

se justifier que les industriels font face à une pression constante vis-à-vis des délais, ce qui ne favorise pas l'adoption d'une procédure rigoureuse, mais chronophage, quand bien même elle pourrait présenter des bénéfices sur le plus long terme. Aussi, les auteurs de la DRM eux-mêmes stipulent qu'à cause de la variété et de la complexité des tâches à mener durant une phase de développement, il ne semble pas possible de développer une seule et unique théorie de la conception qui soit holistique, applicable à tous les cas de figure, et à tous les processus de conception. Les auteurs considèrent préférable de développer une théorie de la conception spécialisée par domaine, ou type de développement, pour ensuite, dans une certaine mesure, pouvoir en unifier certaines [77]. Cash [78] dénonce également ce manque de cadre et de rigueur en sciences de la conception, et propose les bases de ce qu'il appelle « *Theory-Driven Design research* ». Cette théorie s'articule autour de cycles de développements et de tests. Ainsi, les découvertes et les descriptions de phénomènes ou processus observables conduisent à la définition des variables, aux limitations des domaines des variables et à l'espace de conception. Vient ensuite la définition des relations entre les variables, les entités, etc... Enfin, une étape de tests permet de valider ou d'infirmer tout ou partie de la théorie développée et des prédictions réalisées sur la base des modèles théoriques. Une dernière phase, avant de reboucler sur le premier point, concerne la possible extension ou amélioration de la théorie. Finalement, les indicateurs utilisés pour mesurer la performance des processus de conception aident à réaliser une validation graduelle, du plus bas au plus haut niveau à la façon d'un cycle en V. Les vérifications successives assurent que la méthode déployée permet de gagner en « performance », et permet dans le même temps de quantifier ou qualifier le gain obtenu.

Comme cela a été présenté, le problème des sciences de la conception vient de la difficulté de proposer un cadre holistique dans la définition des PDP. Cette absence de références communes empêche l'évaluation de la performance associée au processus de conception proposé ou étudié, et cela constitue le deuxième verrou scientifique de ce travail. Ne pas avoir un formalisme unifié ne permet pas de justifier des apports d'une méthode ou d'un outil sur le processus global, et empêche l'optimisation itérative du PDP sur des bases objectives et quantifiées. Pour aider à débloquent ce verrou scientifique, Pinquie et al. [7] ont proposé un MM pour aider à comparer les apports scientifiques proposés dans les travaux de recherche, présentés en figure 1. Cet outil synthétise tout le contexte de recherche, de l'objet d'étude à la proposition scientifique, en passant par les collections expérimentales et les résultats obtenus. Ce MM constitue en ce sens un premier outil pour aider à implémenter la DRM, tout en étant généralisable à n'importe quel domaine de recherche et non pas qu'aux sciences de la conception. De fait, ce MM sera complété tout au long du manuscrit afin de clairement expliciter la démarche de recherche suivie et les relations entre les différents éléments étudiés, et ce, afin de pouvoir créer une première base de réflexion comparable autour des processus de conception.

Afin d'aider la validation des méthodes en sciences de la conception Barth et al. [79] catégorisent les différentes approches de validation utilisées dans la littérature. Les cinq approches suivantes ont été identifiées « expérimentale », « non expérimentale », « virtuellement expérimentale » ou « quasi-expérimentale », ou aucune de ces catégories. Les auteurs ont constaté que la majorité des études considérées ne formulent pas explicitement le protocole de validation des méthodes proposées, et proposent une liste des principales méthodes de validation basée sur les différents schémas non explicites repérés dans la littérature. Le principal moyen de validation qu'ils ont identifié est la comparaison. Cela regroupe les travaux qui tentent de valider leur méthode par rapport à des études antérieures, des situations initiales ou des benchmarks. La validation par comparaison peut se mettre en œuvre à travers :

- L'implémentation et l'utilisation de la méthode à travers une **application**, pour faciliter la collecte de données et l'évaluation à travers un logiciel.
- Les **groupes de discussion** regroupent les articles qui tentent une démonstration mathématique de la validation de la méthode, sans forcément parvenir à un résultat, mais qui intègre également les principaux schémas identifiés et les discussions sur la validation.
- L'utilisation de **questionnaires** est également un moyen fréquemment utilisé pour récolter les avis de groupes, avant et/ou après la mise en œuvre de la méthode. Cette approche est une méthode de validation quantitative et/ou qualitative en fonction des indicateurs utilisés (données chiffrées, échelle de Likert, etc...).
- Les **simulations** sont également un moyen utilisé pour tenter de démontrer le potentiel de certaines méthodes, en particulier dans des cas de figure avec une certaine quantité d'itérations et/ou d'interactions entre activités.
- Les **analyses statistiques** utilisent des outils mathématiques, tels que l'analyse des variances ou les analyses en composantes principales (ACP), pour tirer des conclusions des données. Cette approche nécessite d'avoir déjà collecté de la donnée en quantité suffisante pour être représentative des tendances à démontrer, ce qui est difficile à mettre en pratique pour la validation de méthode de conception.

Enfin, une dernière catégorie, qualifiable d'**illustration**, regroupe toutes les approches de validation qui ne rentrent pas dans les précédentes catégories identifiées. C'est par exemple le cas des articles qui discutent du potentiel de la méthode, parfois sur la base d'un exemple illustratif, mais sans réellement démontrer ce potentiel par une méthode énoncée ci-dessus.

L'utilisation d'une ou plusieurs de ces méthodes permet de valider les résultats de recherche, y compris en sciences de la conception. La validation par l'utilisation de la simulation offre de bonnes perspectives pour valider l'utilisation de modèles en ingénierie, tandis que la comparaison est en général la piste favorisée pour étudier les différences entre deux PDP. Cette dernière approche sera par ailleurs utilisée pour valider ces travaux de thèse. Nous souhaitons comparer le processus initial de prédimensionnement de lignes et d'arbres de transmission, nommé *as-is*, avec le processus qui intègre de nouveaux outils KBE, et qui est nommé *to-be*.

### 1.7 Conclusion et problématique

Ce premier chapitre a permis de présenter le processus de développement de produits dans un contexte aéronautique.

La première partie de ce chapitre a présenté le contexte global de notre étude dans l'objectif d'améliorer la performance des processus de conception. L'amélioration de la performance du PDP agit sur la compétitivité des entreprises tout en permettant de s'aligner avec les objectifs climatiques du secteur aéronautique. Le premier verrou technique est également présenté, avec la question de l'impact du choix d'un outil, ou d'une ressource, sur la performance du processus de conception.

La deuxième partie a introduit la notion de performance de développement et la représentation d'une activité sous la forme de diagramme IDEF0. Les formules de l'efficacité et de l'efficience sont également ajoutées à la représentation IDEF0 comme mesures de la performance.

La troisième partie a développé la notion de PDP (pour Processus de Développement de Produits, ou processus de conception), tout d'abord dans une perspective générale puis en se focalisant sur les processus propres au secteur aéronautique. Ces derniers intègrent un système de contrôle de la qualité dans le développement de produits à travers différentes normes qui imposent des revues techniques aux étapes clés de la conception, ainsi que les différents livrables attendus à chaque étape du projet.

La quatrième partie a permis de présenter le processus de conception qui sera utilisé pour référence tout au long de l'étude. L'analyse s'est ensuite focalisée sur la présentation du processus de prédimensionnement de lignes et d'arbres de transmission en composite, qui représente le processus utilisé comme cas applicatif de ces travaux.

La cinquième partie a présenté les activités de conception réalisées lors du processus de prédimensionnement. La première activité considérée est le calcul des contraintes de torsion d'un arbre composite, et la deuxième est le calcul des fréquences propres d'une ligne de transmission. D'autres activités existent lors d'un processus de prédimensionnement, mais notre étude se concentre sur ces deux activités dans un premier temps.

Enfin, la sixième et dernière partie a présenté la méthode de recherche en sciences de la conception, avec la DRM de Blessing et Chakrabarti. C'est dans cette section que l'instanciation du MM de *benchmark* est introduit pour faciliter la comparaison des travaux de recherche. Finalement, le verrou scientifique lié à la difficulté d'évaluer quantitativement la performance associée à un processus de développement de produits est présenté.

L'enjeu de ce travail est d'apporter une réponse concrète sur l'identification des leviers de la performance de développement dans le cas d'un produit aéronautique, au confluent de la conception, de la capitalisation et formalisation des connaissances métier, et de la réutilisation des connaissances capitalisées. À chaque nouveau projet de développement de produits, les concepteurs réalisent les mêmes activités que lors des précédents projets, se posent les mêmes questions et refont les mêmes démarches

## 1.7. CONCLUSION ET PROBLÉMATIQUE

intellectuelles. Dit autrement, ils « réinventent la roue » à chaque projet, sans parvenir à réexploiter l'expérience acquise lors des précédents projets. Nous verrons, dans le prochain chapitre, que le KBE est une des solutions développées, principalement par le milieu académique puis, dans une moindre mesure, par les industriels, pour tenter de pallier le problème de la gestion et la réutilisation de la connaissance en ingénierie. La problématique de ces travaux porte d'une part sur le moyen d'évaluer le gain de performance qu'apportent des outils KBE sur le processus de conception, comparativement à un PDP initial. Elle porte, d'autre part, sur le moyen de guider les concepteurs dans le choix des outils les plus adaptés à utiliser pour la résolution d'une tâche spécifique. L'orientation et le choix des outils se font au regard du besoin final de l'activité de conception, du type de projet de développement ou encore des ressources financières, temporelles ou humaines à disposition. Finalement, et en accord avec la figure 1.2 proposée au début de ce chapitre, la problématique à laquelle nous allons tenter de répondre est : « quel est l'impact du choix des outils métier et des moyens de capitalisation sur les performances du processus métier et du processus de capitalisation ».

Finalement, ce premier chapitre a permis de définir notre objet d'étude, à savoir le processus de conception, limité à l'obtention d'un concept prédimensionné en raison des contraintes sur le temps de l'étude. Partant du constat que la capitalisation des connaissances n'est pas suffisamment exploitée comme ressource valorisable par les industriels, notre proposition fondamentale est également présentée en ce sens : l'objectif de ces travaux de thèse est de démontrer que l'utilisation d'outils d'ingénierie basés sur les connaissances (KBE) aide à améliorer la performance du processus de conception. Pour le démontrer, on s'appuiera sur les différentes activités qui composent le processus de développement de lignes de transmission et d'arbres en composite. Les éléments décrits sont ajoutés au MM de *benchmark*, présenté en introduction avec la figure 1, afin de construire le MM instancié en figure 1.20.

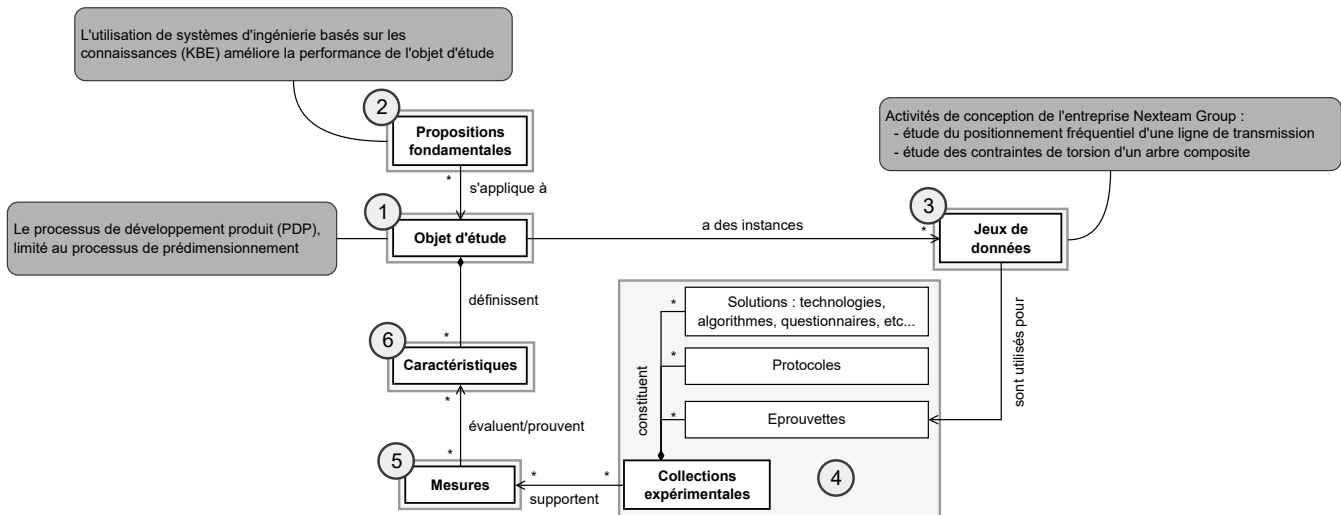


FIGURE 1.20 – Méta-modèle de benchmark à l'issue du chapitre 1

Le prochain chapitre présentera l'analyse de l'état de l'art pour caractériser et mesurer la performance des différents composants de la figure 1.1 : les activités métier, les activités de capitalisation et les ressources utilisées pour réaliser les activités métier.

## Chapitre 2

# État de l'art

### Contenu

---

<b>2.1</b>	<b>La capitalisation des connaissances métier</b>	<b>52</b>
2.1.1	Les objectifs de la capitalisation des connaissances métier	52
2.1.2	La gestion de la connaissance	53
2.1.3	La construction des connaissances	55
2.1.4	Les méta-modèles de capitalisation	57
<b>2.2</b>	<b>L'ingénierie basée sur la connaissance</b>	<b>63</b>
2.2.1	Définition et approche	63
2.2.2	Limites et performances des approches KBE	66
<b>2.3</b>	<b>Mesure de la performance développée</b>	<b>75</b>
2.3.1	Indicateurs de performance des activités métier	77
2.3.2	Indicateurs de performance des outils métier	83
2.3.3	Indicateurs de performance du processus de capitalisation des connaissances	88
<b>2.4</b>	<b>Synthèse de l'état de l'art</b>	<b>93</b>

---

---

Le chapitre précédent a présenté le contexte et le PDP dans un contexte aéronautique, avec une attention particulière portée sur les phases préliminaires du développement. Il a également introduit les deux principaux verrous techniques définissant notre problématique, le premier étant de parvenir à identifier les outils de conception adaptés à la réalisation d'une activité du PDP, et le deuxième étant de parvenir à évaluer quantitativement la performance d'un processus de conception. Pour appliquer une démarche de capitalisation et de réutilisation des connaissances, l'objectif est identifié par l'usage qui va être fait des connaissances. Ainsi, la section 1.5 a présenté deux activités de conception de l'entreprise Nexteam Group, pour lesquelles la capitalisation et la réutilisation des connaissances doivent améliorer la performance en réduisant les temps et coûts de développement.

La structure de ce chapitre organise l'analyse de l'état de l'art autour de l'objectif d'améliorer la performance du PDP. Alors, pour poursuivre la démarche initiée après l'identification de l'« usage » dans le processus, la suite consiste à déterminer la structuration des connaissances pour la réutilisation (notre usage), suivi de l'identification des outils capables de réaliser cette tâche. Enfin, dans notre objectif d'évaluation de la performance, nous souhaitons également mesurer les gains qu'apporte l'utilisation de cet outil au sein du PDP. Ainsi, la performance d'un PDP qui intègre des outils de capitalisation et réutilisation des connaissances métier pourra être évaluée. Ce chapitre sur l'analyse de l'état de l'art est donc articulé autour des quatre sections suivantes, focalisées sur les différents composants de la figure 2.1 :

- La première section décrit les caractéristiques d'un processus de capitalisation par l'étude de la gestion des connaissances, de la construction des connaissances et enfin des ressources utilisables pour réaliser cette capture des connaissances. Le moyen de formalisation et de structuration des connaissances est déterminé à partir de l'usage final, soit la perspective de réutilisation des connaissances dans les activités de prédimensionnement dans notre cas.
- La section suivante introduit les approches KBE, afin d'identifier les éléments caractéristiques de ces outils, ainsi que leurs principales limites. Une étude des coûts et gains apportés par ces outils est également réalisée pour relever les méthodes et KPI utilisés dans la littérature. Cette étape étudie la construction des outils KBE comme ressources des activités métier pour répondre à un usage de réutilisation des connaissances et obtenir un gain de performance.
- La troisième section synthétise les différents KPI utilisés pour mesurer la performance des trois composants d'intérêt : les activités métier, les activités de capitalisation et les ressources du processus métier. Cette étape est la dernière nécessaire pour évaluer les gains qu'apporte l'implémentation d'outils de capitalisation et de réutilisation des connaissances pour répondre à un usage métier. Les indicateurs sont relevés à différents niveaux du PDP : les activités métier, les activités de capitalisation ainsi que les outils métier utilisés comme ressource pour la réalisation des activités métier.
- Enfin, la quatrième et dernière section fait la synthèse de l'analyse de l'état de l'art, afin de guider la proposition de thèse du prochain chapitre.

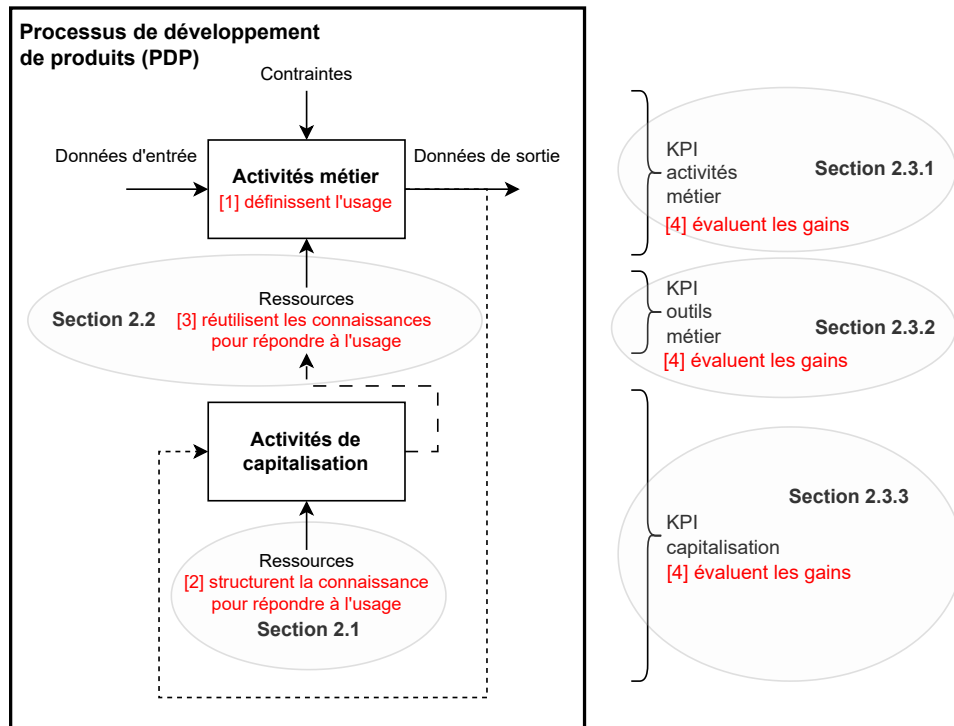


FIGURE 2.1 – Présentation de la structure de l'état de l'art basée sur l'analyse du processus de développement de produits

### 2.1 La capitalisation des connaissances métier

#### 2.1.1 Les objectifs de la capitalisation des connaissances métier

La connaissance devient une ressource de plus en plus centrale dans la gestion des entreprises, car elle représente un levier de performance important dans un environnement de plus en plus concurrentiel. Malgré les différents outils et méthodes proposés dans la littérature pour développer la gestion des connaissances, il demeure difficile pour les entreprises de « capitaliser les connaissances métier » de ses employés [80]. Cette difficulté à capitaliser peut s'expliquer par l'absence d'indicateurs de ROI pour l'industriel, alors qu'investir dans des moyens et du temps à capitaliser, pour des résultats et gains incertains, empêche une démocratisation de ces pratiques. La diversité des méthodes et outils de capitalisation proposés dans la littérature rend difficile l'émergence d'une solution adaptée aux industriels, indépendamment de leur secteur d'activité. Il est donc important de faire émerger les avantages de la capitalisation des connaissances par des KPI quantitatifs, et d'identifier les stratégies de gestion de la connaissance à y associer pour extraire de la valeur des connaissances capitalisées.

Si la finalité de capitaliser les connaissances métier est d'en tirer de la performance, il se pose alors la question des objectifs d'utilisation et du « degré de capitalisation » à appliquer. Une sous-capitalisation n'offrira pas un accès à une BDC (Base de connaissances) suffisamment riche aux utilisateurs, tandis qu'une sur-capitalisation risque de devenir une tâche chronophage qui n'apporte que peu de valeur ajoutée au regard du temps passé et des volumes de données générées trop importants. Bien qu'il existe des outils d'analyse de *big data*, donc de gros volumes de données comme par exemple [81], cela ne représente pas la majorité des cas d'usage en industrie qui n'ont en pratique pas beaucoup de données structurées pour réaliser ces études. Il existe donc une notion de ROI associée à la capitalisation des connaissances, définie par la mise en relation du temps gagné par la capitalisation par rapport au temps, investi, passé à capitaliser. Sur la base de ces observations, les objectifs de la capitalisation des connaissances métier sont explicités pour pouvoir ensuite identifier des KPI qui y seront associés :

- **Établir des liens entre les prises de décision et les résultats obtenus :** Le manque de données et de contexte sur l'enchaînement réel des activités, qui crée le processus, empêche de relier les résultats obtenus aux prises de décision réalisées en amont. De même, si des travaux n'ont pas pu déboucher sur des résultats, puis que d'autres alternatives sont explorées sans capitaliser ces résultats partiels, alors la probabilité de répéter ces scénarios à l'avenir sont importants. La capitalisation aide dans ce cas à faire le lien entre des décisions et des résultats qui n'ont pas été ceux espérés. Le corollaire de cette réflexion permet de supposer que si des liens sont identifiés entre des causes/justifications/prises de décision et des résultats, alors il est également possible de construire la relation inverse de façon à guider l'utilisateur pour atteindre un objectif donné. Ainsi, il est possible d'orienter les concepteurs vers les données, méthodes ou encore outils et ressources adaptés pour réaliser une tâche spécifique [82].
- **Améliorer la recherche d'informations :** Le temps qu'un concepteur peut passer à rechercher des informations pour pouvoir réaliser ses tâches, en particulier dans le secteur aéronautique, est estimé à 30 % [83, 84]. Ce ratio pourrait augmenter jusqu'à 60 % dans les études sur les processus opérationnels, invoquant le manque de communication, la recherche et l'attente de

données, le travail de la donnée pour la rendre utilisable ou bien le travail avec de mauvaises données comme sources de ces pertes de performance opérationnelles [85]. L'utilisation de mauvaises données serait estimée entre 1 et 10 %, soit la proportion des données des BDC qui seraient imprécises ou erronées d'après l'étude de [86]. Sur cette base, les études de Hicks et al. [87, 88] identifient la gestion des informations (et des données et connaissances) comme un levier de performance important à travers la réduction des pertes d'information. Durant notre étude, nous avons pu observer un temps important perdu par les concepteurs à la recherche d'informations. Ces informations concernent en général des données nécessaires manquantes pour réaliser des tâches techniques ou encore des éléments sur les travaux précédemment menés comme des méthodes dans le cas de nouvelles tâches et de montée en compétences.

- **Réutilisation des connaissances lors de futurs travaux :** La réutilisation des connaissances est un enjeu majeur du déploiement de systèmes KBE mais dont les méthodes de mise en œuvre ne sont toujours pas bien formalisées et les approches proposées jusqu'à maintenant peinent à être implémentées efficacement dans l'industrie [89]. L'absence de norme d'échange des connaissances complexifie également la communication entre les différents outils [90]. Saintier et al. [91] avait déjà identifié les causes de la faible réutilisation des connaissances : pertes de connaissances à cause des mauvaises modélisations et limites des langages de modélisation, développement du mauvais type d'application KBE, coûts de maintenance trop élevés causés par un développement d'application non standard ou trop spécifique et, enfin, la difficulté d'échanger les connaissances entre les utilisateurs et la partie informatique. Dans notre contexte d'étude initial (*as-is*), les informations à disposition des concepteurs ne sont pas facilement accessibles ou bien pas accessibles du tout (si pas capitalisées) car il n'existe pas d'infrastructures, outils ou méthodes standardisés, ce qui freine ou empêche leur réutilisation. Les éléments généralement réutilisés sont les méthodes qui ont démontré leur validité/corrélation par rapport aux objectifs, les procédures ou encore les normes aéronautiques.

### 2.1.2 La gestion de la connaissance

Une fois les objectifs de la capitalisation identifiés, la gestion des connaissances reste à définir. Selon Dalkir [92], la gestion de la connaissance doit répondre à plusieurs objectifs, dont ceux :

- de faciliter la transition entre les employés qui partent de l'entreprise (retraite, départ volontaire) et leurs successeurs ;
- de minimiser la perte de mémoire de l'entreprise et l'érosion des connaissances causées par les départs cumulés ;
- d'identifier les ressources et les domaines de connaissance critiques de l'entreprise tels qu'elle « sait ce qu'elle sait et sait bien le faire - et elle sait également pourquoi elle le fait » ;
- de construire des outils et méthodes à l'échelle de l'individu, des groupes et de l'entreprise capables d'enrayer la perte du capital de connaissance.

## 2.1. LA CAPITALISATION DES CONNAISSANCES MÉTIER

---

Différentes définitions de la gestion des connaissances sont proposées dans la littérature [93, 94, 95] dont les nuances dépendent des secteurs ou domaines d'application, suivant que ce soit les sciences cognitives, les processus industriels ou technologiques [92]. Une définition qui correspond à notre contexte de recherche est celle de [94] :

« La gestion des connaissances correspond à la création et à la gestion d'un environnement qui encourage la création, le partage, l'apprentissage, l'amélioration et l'organisation des connaissances au profit de l'organisation et de ses clients. »

Ensuite, définir précisément le terme « connaissance » reste un sujet ouvert au sein de la communauté scientifique [96, 97]. Dans la littérature, la définition de la connaissance se retrouve régulièrement liée avec la définition de la « donnée », de l' « information » et également de la « sagesse » dans le quadriptyque *Data, Information, Knowledge, Wisdom* (DIKW) [98, 99, 100, 101, 102]. Dans ces travaux, nous ne faisons pas de distinction claire entre la connaissance et la sagesse, et une définition de cette dernière dans la littérature est la mise en application des connaissances dans un cadre pratique. Les principales caractéristiques de la connaissance, proposées par [103], sont qu'elle se distingue des données et des informations, elle comporte une dimension tacite et explicite, elle revêt un caractère personnel, elle est indissociable de l'environnement de travail dans lequel elle se situe : elle existe et prend forme dans des actions et des interactions et enfin elle ne saurait, pour toutes ces raisons, être appréhendée en-dehors de son contexte de production et de diffusion. Plus généralement, Davenport et al. [104] proposent de définir les connaissances comme « de l'information combinée à de l'expérience, du contexte, de l'interprétation et de la réflexion ». Dans le cadre de ces travaux, nous prendrons les définitions suivantes concernant la *donnée*, l'*information* et la *connaissance* :

- **Donnée** Représentation symbolique, sans organisation ni sens particulier, d'une propriété observable d'un objet ou d'un évènement dans son environnement.
- **Information** Traitement de la donnée de manière à donner du sens, permettre la compréhension du contexte et aider à la prise de décision.
- **Connaissance** Combinaison de données et d'informations organisées avec l'expérience, la compréhension, l'apprentissage cumulé ou encore l'expertise sur une activité ou un problème donné.

Sur la base de ces définitions, il apparaît que les difficultés à « capitaliser les connaissances métier » proviennent des difficultés à capturer et formaliser l'expérience acquise par chaque personne au travers de ses expériences, expertises ou apprentissages personnels. Cette définition peut être complétée par la décomposition des différentes formes de connaissance : la littérature scientifique a vu émerger plusieurs concepts sous-jacents de la connaissance. Tout d'abord, en différenciant le *know-how* (savoir comment faire du vélo) et le *know-that* (savoir que la capitale de la France est Paris) [100]. L'avantage du *know-how* selon [105] est la facilité de transformer ce type de connaissances en instructions ou conditions explicites du type « si... alors... ». Dans les années 1990, les concepts de connaissance *tacite* et *explicite* sont formalisés par Nonaka [106, 107] dans l'objectif d'unifier management, technologie et connaissance avec la méthode SECI (pour *Socialisation, Externalisation, Combinaison, Internalisation*). La connaissance tacite, d'après [108], se définit par *ce que l'on sait sans pouvoir l'exprimer*,

tandis que la connaissance explicite est aisément exprimable dans un langage - universel - sous forme d'énoncés grammaticaux, de formules ou encore de livres parce qu'elle est objective et a cette valeur universelle. À travers leurs travaux, Nonaka et al. [106, 107] proposent une approche pour convertir la connaissance tacite en connaissance explicite à travers la spirale de la création des connaissances, voir la figure 2.2. Selon [109], les approches proposées par Nonaka souffrent de limites freinant leur émancipation. L'approche est jugée trop statique tandis que la connaissance a une dimension dynamique, qui évolue dans le temps et qui a besoin d'être maintenue à jour. D'autres études [110, 111] remettent également en cause la distinction entre connaissance tacite et explicite telle que définie par Nonaka et émettent des doutes quant à la capitalisation effective de la connaissance tacite au travers des questionnaires, ce qui peut possiblement mener à la création et au stockage de « gigantesques » BDC contenant des informations non-contextualisées, non-dynamiques et ne pouvant ni être réutilisées, ni générer de valeur. D'autres nuances ou classifications de la connaissance sont déclinées dans la littérature scientifique, dont une synthèse de [112] qui détaille les dimensions individuelle, sociale, procédurale ou encore relationnelle que la connaissance peut prendre, mais ces travaux se limitent à la dimension tacite ou explicite de la connaissance.

### 2.1.3 La construction des connaissances

Pour en revenir à la création des connaissances, ces dernières s'acquièrent à travers un cycle continu que Nonaka [106] a représenté sous une spirale alternant entre quatre cadrans, à voir sur la figure 2.2. Ce cycle de l'évolution de la connaissance, d'après leurs auteurs, est applicable à tous les niveaux et tous les acteurs de l'entreprise.

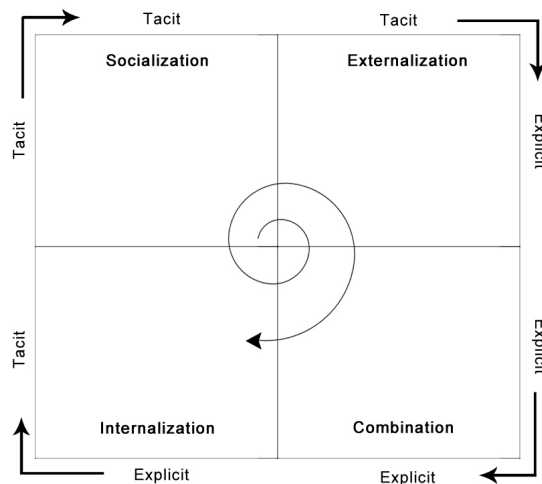


FIGURE 2.2 – Spirale de la création de connaissance (extrait de [106])

Les quatre étapes du cycle de la connaissance sont, d'après Nonaka :

- **La socialisation** est la transmission de connaissances tacites d'une personne à une autre ;

## 2.1. LA CAPITALISATION DES CONNAISSANCES MÉTIER

- **L’externalisation** est la transmission de connaissances tacites en connaissances explicites, ce qui constitue de nouvelles connaissances capitalisables par leur explicitation par des vecteurs de capitalisation (rapports écrits, questionnaires, supports de présentation, autres...);
- **La combinaison** permet de transformer des données explicites sous un nouveau format pour faciliter leur utilisation;
- **L’internalisation** est l’absorption de connaissances explicites pour les transformer en connaissances tacites par l’acquisition d’un savoir-faire, l’expérience, la compréhension de document ou autre.

La spirale de la connaissance explique comment la connaissance évolue au sein d’une entité industrielle, alternant entre une forme tacite et une forme explicite. D’autres cycles de la gestion de la connaissance sont synthétisés dans les travaux de [92], et il propose un cycle générique pour la gestion des connaissances, articulé autour de trois actions (figure 2.3 extraite et adaptée de [92]). La première étape est la création et/ou l’extraction des connaissances en codifiant ces savoir-faire identifiés. Cette création de connaissance induit également l’existence d’indicateurs pour évaluer la pertinence de chaque connaissance capitalisée par rapport aux besoins de l’entreprise, pour étudier la mise à jour des connaissances (évolution, suppression, etc...). La deuxième étape est le partage de cette connaissance acquise après avoir une étape de contrôle. Enfin, les connaissances sont contextualisées lors de la troisième étape pour permettre leur réutilisation par n’importe quel utilisateur, ce qui peut constituer de nouvelles connaissances par l’utilisation et la mise à jour de celles utilisées. Les différentes approches présentées dans l’état de l’art dans les sections suivantes reprennent cette approche globale de la construction de la connaissance afin de l’intégrer dans différents outils.

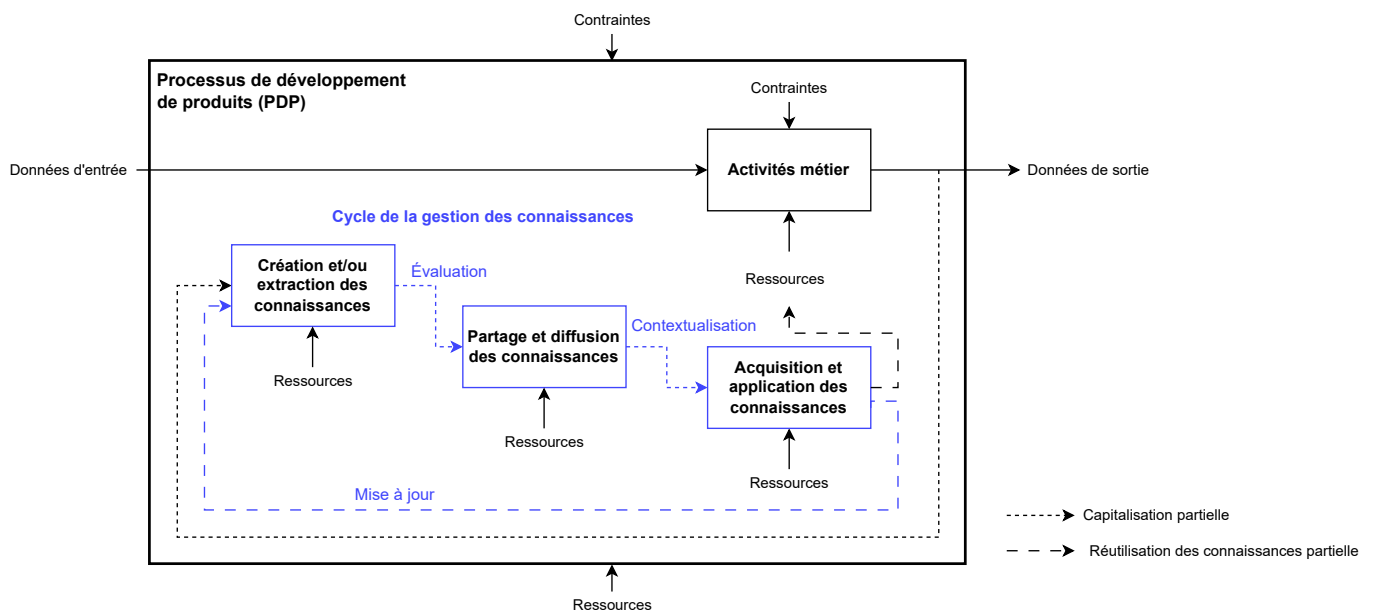


FIGURE 2.3 – Cycle de la gestion des connaissances (extrait et adapté de [92])

### 2.1.4 Les méta-modèles de capitalisation

La traçabilité des informations des produits et des processus, qui traduit le résultat de la capitalisation, représente « l'aide qui peut être fournie aux concepteurs avec une modélisation des éléments clés du projet d'ingénierie » d'après Eynard [113]. La capitalisation des informations relatives aux produits et aux processus peut aider les concepteurs dans le processus décisionnel et dans la réalisation de certaines tâches. Il existe plusieurs moyens pour capitaliser les connaissances d'un processus ou d'un produit. La littérature scientifique présente plusieurs solutions comme les ontologies [114], le MBSE (*Model-Based System Engineering*) [115] ou encore les graphes de connaissances [116]. Pour nos travaux, le choix de l'étude du moyen de capitalisation s'est porté sur les MM de processus, pour leur capacité à acquérir des connaissances métier à travers la capture des justifications des décisions et des choix techniques d'après [117]. Pour cela, ils identifient quatre caractéristiques importantes à capitaliser pour atteindre cet objectif : les paramètres et valeurs du produit final, les dessins, plans et modèles pour faciliter la compréhension du produit final, les décisions appliquées durant le processus et enfin les justifications de ces décisions. Ces quatre points offrent des éléments de contexte sur le « quoi ? », c'est-à-dire quelles sont les données et les paramètres, avec quelles valeurs, quels modèles ou dessins et enfin quelle décision : donc quelle activité de conception est réalisée ? Les décisions appliquées peuvent également traduire le « comment ? », et donc les méthodes et outils utilisés pour réaliser la tâche. Enfin, la justification répond au « pourquoi ? », avec l'explicitation des causes qui ont entraîné la réalisation d'une activité. Cette formalisation du contexte de l'activité de conception a été identifiée comme étant une bonne approche de capitalisation dès les années 1990, et a été enrichie dans une autre étude de Zachman [118] qui en propose une structure (un *framework*). Cette structure s'articule autour du QQQCOP, soit la description de « Qui ? a fait Quoi ? Quand ? Comment ? Où ? et Pourquoi ? », et est considérée comme étant suffisamment riche pour capturer les connaissances des activités de conception. Ces informations orientent principalement les recherches vers l'identification des liens entre les causes et les conséquences d'un processus, ce qui constitue le premier objectif identifié au début de ce chapitre, mais présentent également des bonnes propriétés pour répondre aux deux autres objectifs. De plus, l'approche du contexte par QQQCOP donne une définition simple et générique de chaque activité tout en permettant de capturer des éléments complexes, variés et hétérogènes - ce qui est en accord avec l'objectif de capitaliser « au plus juste ».

Dans ses travaux, Es Soufi [15] utilise cette définition du contexte basée sur le QQQCOP pour tracer les activités d'un processus, et il identifie les deux éléments clés suivants pour parvenir à capitaliser les informations du contexte QQQCOP lors de ces activités :

- **Un MM de capitalisation** qui représente les concepts à capitaliser avec leurs principales caractéristiques.
- **Un langage de modélisation** qui permet de traduire le MM de capitalisation en une représentation formelle, un objet numérique manipulable pour en extraire de la valeur ajoutée.

Pour définir un MM, l'OMG (*Object Management Group*) [119] a conçu la norme MOF (*Meta-Object Family*), décomposée en quatre niveaux conceptuels afin de modéliser n'importe quel système, voir figure 2.4 (issue de [15]). Cette architecture est décomposée en quatre niveaux d'abstraction et de modélisation, tels que :

## 2.1. LA CAPITALISATION DES CONNAISSANCES MÉTIER

---

- **M0 (réalité)** : correspond au système physique, réel, à modéliser. Dans notre étude, cela correspond par exemple aux arbres et lignes de transmission.
- **M1 (modèle)** : modèle permettant de décrire le système à modéliser d'un point de vue utilisateur. Ce niveau intègre par exemple les données et caractéristiques de chaque produit, par exemple les données de longueur, diamètre et épaisseur pour définir un tube et les séquences des activités pour définir un processus.
- **M2 (méta-modèle)** : définit les concepts du modèle et les relations associées à ces concepts via le standard MOF (avec UML (Langage de Modélisation Unifié ou *Unified Modeling Language*) par exemple). À ce niveau, les relations entre les différents modèles définis précédemment permettent de définir des concepts plus globaux et de lier les produits au processus de fabrication, en intégrant un ensemble de données collectées durant le cycle de vie du produit.
- **M3 (méta-méta-modèle)** : ou MOF, permet de définir, par un méta-méta-modèle auto-descriptif, les concepts et relations du méta-modèle sur la base de classes, associations et d'héritages. C'est le modèle abstrait de plus haut niveau qui permet de décrire n'importe quel méta-modèle conceptuel.

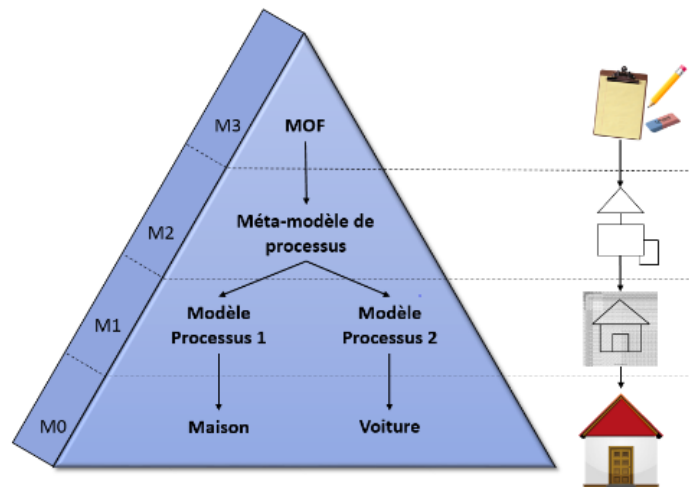


FIGURE 2.4 – Représentation de la norme MOF (extrait de [15])

Il existe différents MM dans la littérature scientifique permettant de modéliser les processus [120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132]. Ces MM de processus peuvent également être couplés avec des caractéristiques « organisationnelles », des « produits » ou encore de « risques » pour englober davantage de caractéristiques à modéliser. Le choix du MM le plus adapté à la modélisation d'un processus n'est pas évident, et plusieurs critères sont explicités dans la littérature. Es Soufi [15] a réalisé un *benchmark* des différents MM intégrant les données des produits, dont celui proposé par Demoly et al. [133, 134], sur la base des critères suivants. Le premier critère est la capacité de capitalisation des QQQCOP, et tous les MM ne permettent pas de capturer ces six informations contextuelles. Ce sont en général le « Quoi? », « Comment? » et le « Pourquoi? » qui sont les plus

## 2.1. LA CAPITALISATION DES CONNAISSANCES MÉTIER

difficiles à capturer dans un environnement réel, tandis que le « Qui ? », « Quand ? » et « Où ? » sont en général plus facile à tracer. La difficulté à capturer les trois premières caractéristiques énoncées vient de la variété des formes et types des informations à identifier : par exemple, le « Comment ? » va capitaliser les méthodes, documents, modèles - les ressources à disposition de l'utilisateur - qui seront utilisés pour réalisation l'activité, mais cela nécessite d'avoir cartographié et identifié l'ensemble de ces éléments au préalable dans le MM pour pouvoir capturer ces liens au moment où l'activité est réalisée.

Viennent ensuite les critères sur les capacités de représentation du MM, donc les critères de simplicité (nombre de concepts et qualité de leur représentation graphique [123]), de richesse (nombre de concepts que capture le modèle [123]), d'évolutivité (capacité à maintenir et ajouter de nouveaux concepts au sein de l'existant), de norme (si la construction du MM est régie par des standards), la granularité (capacité à représenter différents niveaux d'abstraction de l'objet modélisé [135]) ou encore la consistance (ou la logique de représentation qui garantit qu'il n'y a pas de concepts redondants ou inutiles [136]). Les critères sur l'implémentation du MM vont passer par les normes, mais également par le support logiciel (l'existence d'un logiciel permettant d'implémenter le MM) et les preuves de l'implémentation sur des cas applicatifs concrets. Par rapport à ce dernier point, certaines solutions peuvent s'implémenter en se greffant aux systèmes actuels tandis que d'autres nécessiteront de réimplémenter intégralement une solution ce qui donne également un critère d'intégration.

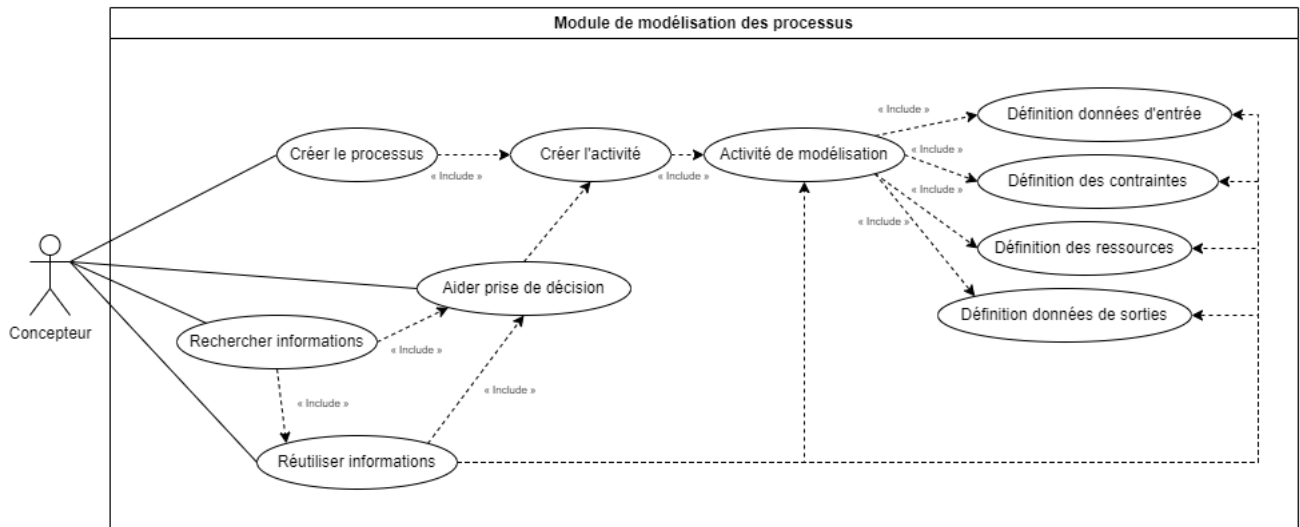


FIGURE 2.5 – Cas d'utilisation du méta-modèle au sein du processus basé sur les objectifs définis au début de la section

L'étude et la comparaison des différents MM adaptés à la capitalisation des processus métier reprend les travaux d'Es Soufi [15] : ils ont porté sur la comparaison de différents MM via un *benchmark* qui intègre la majorité des critères identifiés ci-dessus (voir figure A.2), dont la capitalisation du contexte et les critères de simplicité, de richesse, de norme, de formalisme, de support logiciel, de granularité, de consistance et d'implémentation. Il conclut que les MM présentés dans les travaux de [120], de [121] et de [137] sont les plus adaptés à la représentation de produits car ils permettent d'intégrer la gestion des versions d'une part tout en traçant la donnée « produit » dans le processus dans lequel

## 2.1. LA CAPITALISATION DES CONNAISSANCES MÉTIER

elle s'inscrit d'autre part - voir figure A.1. La gestion des versions est une caractéristique centrale dans la capitalisation des traces pour soutenir la justification des résultats obtenus et l'historique tout au long des projets.

En plus de la base des trois MM « produit-processus » identifiés par Es Soufi, il est important d'adapter et/ou compléter certaines caractéristiques afin de correspondre au besoin réel de l'entreprise d'un point de vue industriel, projet, organisationnel ou encore humain [123]. Pour cela, l'étude des différents cas d'utilisation du MM produit-processus doit se faire en considérant le contexte de travail et les besoins de l'industriel. Trois objectifs de la capitalisation ont été présentés pour le MM, au début de la section, auxquelles peuvent s'ajouter la création de processus et d'activités - de conception dans notre cas. Étant donnée l'approche IDEF0 retenue, les activités sont contextualisées avec des entrées, des contraintes, des ressources et des sorties. L'ensemble de ces éléments, c'est-à-dire le PDP avec l'enchaînement des activités de conception, s'articule autour du MM de capitalisation suivant la figure 2.5.

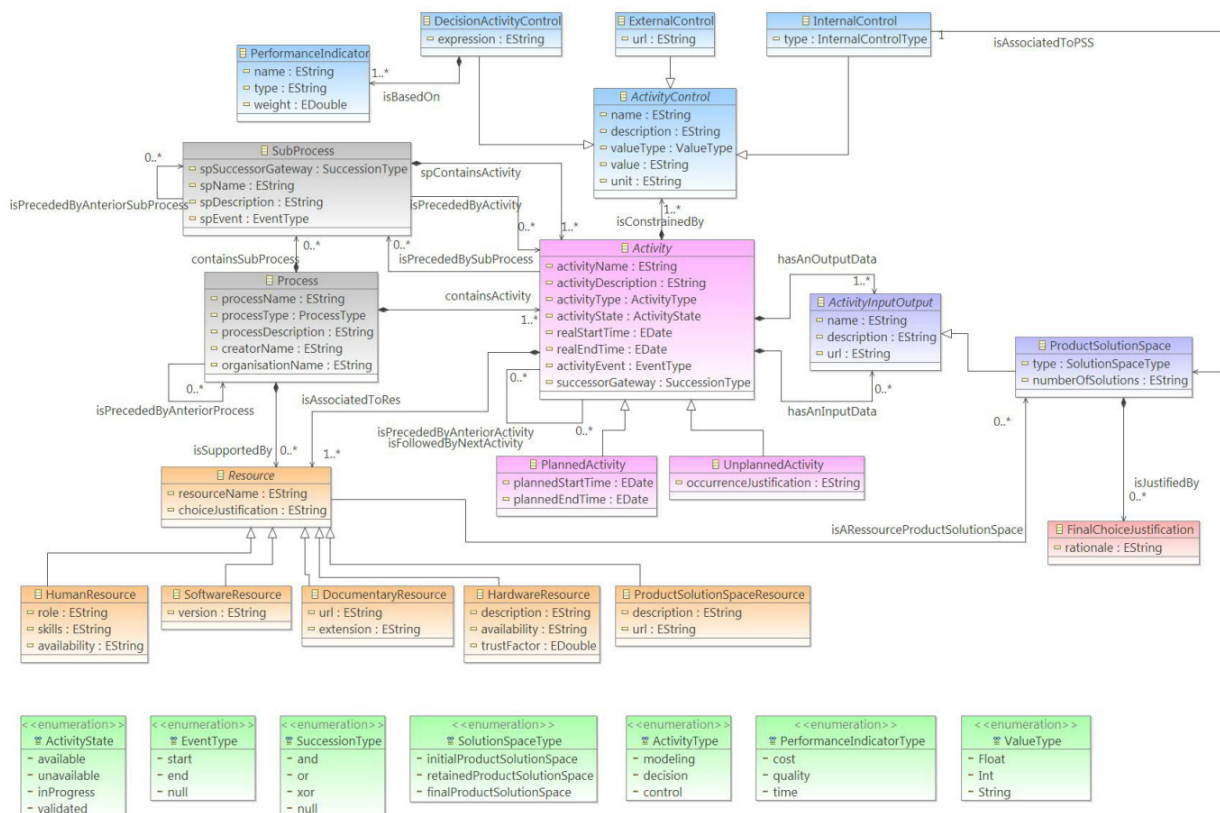


FIGURE 2.6 – Méta-modèle de processus proposé par Es Soufi (extrait de [15])

Le MM proposé par Es Soufi, en figure 2.6, comme certains autres MM étudiés dans le *benchmark*, permettent de contextualiser les activités d'un processus en capturant les QQQCOP. Les représentations de ces MM font une distinction claire entre les éléments d'entrée ou de sortie du processus (données, paramètres, espaces des solutions, etc...) ainsi que les ressources de l'activité (ressources humaines, logiciels, matériels, documents, etc...). Cette représentation impose d'avoir formalisé les

## 2.1. LA CAPITALISATION DES CONNAISSANCES MÉTIER

---

éléments de façon fixe et définitive dans une de ces catégories, ce qui empêche le MM de capturer les informations associées à la création ou modification de ressources. Or, lorsqu'il y a ces modifications, c'est qu'un besoin est apparu au niveau du processus de créer une nouvelle ressource ou de modifier une ressource existante. Ces MM ne sont pas capables de capturer ces évolutions et sont restreints aux seuls paramètres qui seraient enregistrés dans leurs variables. Cette limite empêche de capturer l'ensemble des activités d'un processus, et notre proposition s'attachera à proposer de nouveaux éléments pour améliorer l'éventail des éléments capitalisables dans un MM.

Par exemple, une des activités les plus réalisées par les concepteurs lors du développement produit est la transformation d'un ensemble de données en un modèle d'ingénierie, représenté par le diagramme en haut à gauche de la figure 2.7. Les MM de la littérature, d'Es Soufi ou d'autres, catégorisent bien les données en entrée (comme des données en entrée) mais le modèle en sortie n'est pas nécessairement catégorisé. Le problème apparaît s'il est catégorisé comme une ressource ou comme une « entrée/sortie », auquel cas le modèle ne peut plus passer d'une représentation à l'autre. Ainsi, si un concepteur souhaite réutiliser un modèle existant pour une tâche de conception, le MM n'est pas capable de représenter si le modèle passe de « donnée de sortie » à « ressource ». Or, notre besoin est de capturer le contexte QQQCOP le plus riche possible, ce qui impose de labelliser correctement les éléments en jeu lors de la réalisation d'une activité de conception. Autrement dit, le lien entre n'importe quelle entrée et sortie doit pouvoir être capturé, à condition que ce soit un élément défini dans la structure du MM (pour des raisons de logique et d'unicité des définitions des objets).

Pour les autres exemples, le schéma en haut à droite illustre la capture de l'évolution d'un modèle en un autre, et la justification permet donc de capitaliser les causes de cette évolution comme des limitations techniques, l'obtention de nouvelles données d'entrée ou encore la correction d'erreurs de modélisation. Ce type de modélisation n'est pas possible pour les MM qui considèrent les modèles comme des ressources, car incapables d'évoluer. Par exemple, si le modèle A1 est modifié en un modèle A2, les deux seront présents comme ressource des activités. En revanche, la justification de l'évolution du modèle A1 en le modèle A2 n'est jamais capitalisée par le MM, ce qui empêche de tracer les causes de cette évolution. C'est également le cas du schéma milieu gauche, qui illustre l'évolution d'un document, par exemple sur le passage d'un indice ou lors de corrections, dont les informations sont généralement tracées dans le document. Si le document n'est pas considéré comme une « entrée/sortie » (ce qui est le cas car une méthode ou un rapport technique sont considérés comme de la ressource dans la littérature), alors il est impossible de capturer ce lien d'évolution dans le MM de capitalisation. Les autres exemples abondent en ce sens avec, en bas à gauche, un cas applicatif d'outil KBE : le modèle paramétrique, qui est un outil métier, est utilisé en entrée avec les données des paramètres pour générer en sortie de l'activité un modèle instancié. Un autre cas, plutôt orienté vers les MM qualifiés de « produit-processus » puisqu'il trace le lien entre les produits, conçus et fabriqués, et les processus, est illustré avec la capitalisation de la transformation d'un brut de matière qui serait par exemple usiné en un produit fini sur la figure milieu-droit. Enfin, un dernier exemple d'utilisation du MM proposé est pour la capitalisation des données générées par la caractérisation, manipulation ou utilisation du produit. Cela peut par exemple inclure les données générées lors d'essais de caractérisation ou bien lors des phases de contrôle qualité à l'issue de la fabrication, et cette capitalisation permet de faire un lien entre les données et modèles utilisés lors des phases d'études avec les résultats finaux réels obtenus sur le produit physique.

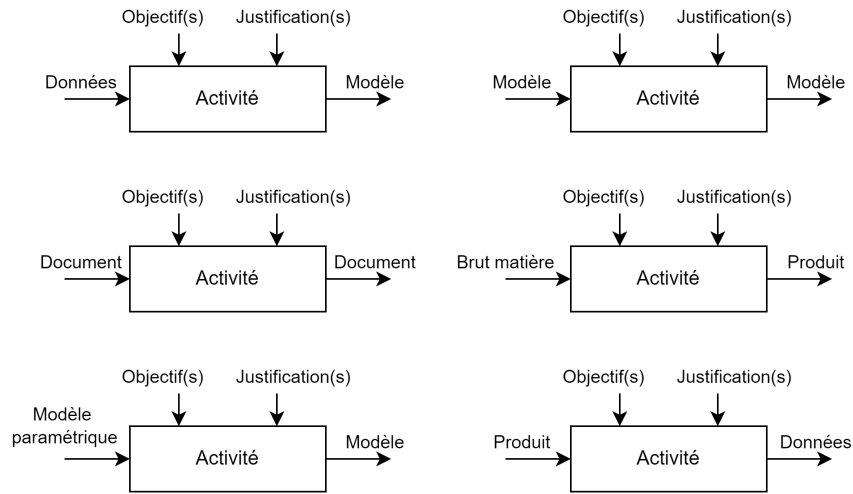


FIGURE 2.7 – Exemples de cas de figure pour lesquels le méta-modèle proposé est un moyen de capitalisation pertinent

Ces exemples offrent une bonne représentation des cas d'utilisation concrets que le MM de capitalisation doit pouvoir capturer, tout en fournissant une base pour les cas illustratifs qui seront réalisés dans les prochains chapitres. Ce sont aussi des moyens d'illustrer les limites des MM existant, ce qui permet d'introduire notre proposition de MM en section 3.2. Notre proposition de MM capture explicitement tous les composants du QQQCOP, tout en étant capable de faire preuve de souplesse sur la caractérisation (donnée, paramètre, modèle, produit, matériau, document, etc...) des éléments capitalisés pour garantir la construction d'une BDC riche et complète.

La prochaine section présente les méthodes KBE ainsi que leurs limites dans un premier temps. Dans un second temps, les méthodes KBE implémentées dans la littérature seront étudiées du point de vue des gains de performance qu'elles apportent, et de la façon dont ces gains sont mesurés.

## 2.2 L'ingénierie basée sur la connaissance

### 2.2.1 Définition et approche

L'ingénierie basée sur les connaissances, donnant l'acronyme KBE, est un concept qui est apparu dans les années 1980 avec l'émergence de l'IA (Intelligence Artificielle), de la CAO et de la programmation [90, 138]. Les promesses de ces approches basées sur la connaissance sont nombreuses puisque, à travers la formalisation et de la capitalisation des connaissances métier de l'entreprise, la conception de produits peut être automatisée et simplifiée par la réutilisation et la combinaison de ces connaissances, accélérant ainsi les phases d'étude tout en optimisant le produit. Les définitions du KBE sont nombreuses et il n'en existe actuellement pas une qui fait consensus. Une synthèse des principales définitions présentes dans la littérature scientifique, réalisée par [89], est présentée dans le tableau 2.1 ci-dessous et, parmi celles-là, la définition de La Rocca [138] capte la majorité des caractéristiques souhaitées dans le contexte de cette étude. Il définit le KBE comme une « technologie basée sur l'utilisation d'un logiciel dédié, le système KBE, capable de capturer et de réutiliser intelligemment les connaissances d'ingénierie liées aux processus et aux produits, dans l'objectif de réduire les temps et les coûts de développement par les moyens suivants : l'automatisation des tâches répétitives et non-crétatives ainsi que l'optimisation multidisciplinaire de la conception durant l'ensemble du processus de conception ».

TABLE 2.1 – Différentes définitions du KBE (extrait de [89])

Définition	Référence
Le KBE est l'implémentation de méthodes et d'outils qui supportent des systèmes informatiques qui font de la connaissance structurelle le cœur de la conception en ingénierie.	[139]
Certaines tâches sont directement définies par le processus de transfert de l'expérience du concepteur expérimenté ou du savoir-faire industriel. Ce processus est également appelé KBE.	[140]
Le KBE peut être défini par le processus de transfert de l'expérience de conception d'un concepteur expérimenté et de la documentation des précédents projets vers les nouvelles ou futures équipes de concepteurs.	[141]
La recherche actuelle des technologies et méthodes de capture et de réutilisation des connaissances, aussi appelé KBE.	[142]
Technologie basée sur l'utilisation d'un logiciel dédié, le système KBE, capable de capturer et de réutiliser intelligemment les connaissances d'ingénierie liées aux processus et aux produits, dans l'objectif de réduire les temps et les coûts de développement par les moyens suivants : l'automatisation des tâches répétitives et non-crétatives ainsi que l'optimisation multidisciplinaire de la conception durant l'ensemble du processus de conception	[138]
Le KBE est un large domaine à la croisée de la CAO, de l'IA et de la programmation. Il permet d'accélérer la conception et de faciliter la réutilisation des connaissances entre les conceptions et donc de réduire les délais et coûts de conception.	[143]

Suite en page suivante

Table 2.1 – suite

Définition	Référence
Le KBE est une technologie capable de mélanger les capacités de KBS (Système basé sur les connaissances ou <i>Knowledge-Based System</i> ) avec celles de la CAO et de la conception système.	[144]
Le KBE est généralement considéré comme un terme parapluie pour décrire l'utilisation de connaissances pour automatiser ou assister dans des tâches d'ingénierie.	[145]
Le KBE peut être défini comme l'utilisation d'un logiciel (le système KBE) pour capturer et réutiliser les connaissances des produits et processus d'ingénierie de façon pratique et maintenable.	[146]
Le KBE est un cas particulier des Systèmes Basés sur la Connaissance (KBS) avec un détail sur la conception de produits d'ingénierie et les activités connexes comme l'analyse, la fabrication, le planning de production, l'estimation des coûts et la vente.	[147]
Le KBE représente l'étape suivant l'IAO (Ingénierie Assistée par Ordinateur ou <i>Computer-Aided Engineering</i> ) et est une méthode en ingénierie représentant le mélange de POO (Programmation Orientée Objet), les techniques d'IA et les technologies de CAO, offrant l'opportunité d'utiliser des solutions automatisées pour personnaliser les produits ou générer des variantes.	[148]
Le KBE est l'utilisation de techniques logicielles avancées pour capturer, réutiliser et traiter la connaissance de manière intégrée.	[149]
Un système KBE peut être considéré comme un type de KBS pour la réalisation de tâches d'ingénierie.	[91]
Techniquement, le KBE est utilisé [...] pour décrire un type particulier de KBS basé sur un langage POO et qui est intégré dans un outil de modélisation géométrique.	[150]

Les systèmes KBE, ou KBS, sont en quelque sorte une évolution spécifique de la combinaison des systèmes experts et de l'IA, qui serait caractérisé par la représentation de la connaissance séparée entre le domaine d'étude, dans une BDC, et entre le traitement de la connaissance, avec la gestion des connaissances [151]. De cette façon, cela permet de différencier la description du problème de sa résolution, mais également d'explicitier les connaissances associées à un domaine d'application spécifique, relatif au problème à résoudre ou optimiser [151].

Depuis le début du XXIème siècle, la recherche sur le développement du KBE est principalement orientée sur l'automatisation de tâches à faible valeur ajoutée de conception, généralement par l'utilisation de la modélisation générative et des règles de conception de type « si...alors... » [150]. Dans la littérature scientifique, ces approches sont principalement implémentées dans les secteurs aéronautique et automobile, pour soutenir les concepteurs dans les tâches répétitives, mais n'ont pas donné lieu à la formalisation d'une méthode ou approche d'implémentation générique, chaque système étant développé en « boîte noire » et sur un cas applicatif spécifique qui ne permet pas d'être réutilisé ou adapté [91]. Les outils et moyens de capitalisation développés sont spécifiques aux usages pour lesquels ils sont conçus.

Pour répondre au besoin de méthodes pour implémenter les approches KBE, plusieurs initiatives apparaissent à la fin du XXème siècle, comme la méthode CommonKADS [152] dans les années 1980

ou la méthode MOKA (Méthodologie et outils orientés vers l'ingénierie basée sur la connaissance ou *Methodology and tools Oriented to Knowledge-based engineering Application*) dans les années 2000 [149]. Studer et al. établissent la construction des KBS lors du passage de la construction d'une BDC, issue des connaissances des utilisateurs, à une approche plus méthodique et structurée, ce qui ouvre finalement la voie à l'étude d'une nouvelle discipline [153]. Un aperçu des principales méthodes KBE présentes dans la littérature, non exhaustif, est présenté en suivant.

- La méthode CommonKADS est le résultat de plusieurs projets de recherche internationaux réalisés sur la base du programme de recherche européen ESPRIT de 1983 [152]. Cette méthode se base sur l'utilisation de six modèles (organisationnel, tâche, agent, connaissance, communication et conception) [154, 155, 156]. Des limites à cette approche sont formulées par [157].
- MOKA a été développée dans le cadre de programmes de recherche européen au début des années 2000 (ESPRIT 7704, ESPRIT 25418) [149, 156]. Le cycle de développement de MOKA se décompose en une modélisation informelle et une modélisation formelle [158]. La première est structurée autour du modèle ICARE (*Illustration - Constraint - Activity - Rule - Entity*), tandis que la deuxième structure les connaissances sous un format interprétable par une machine, par exemple avec un langage de modélisation comme UML, les ontologies, les graphes de connaissances, etc... [159].
- La méthode DEE (Moteur de Conception et d'Ingénierie ou *Design and Engineering Engine*) [160] a été développée par l'université technique de Delft pour apporter une solution aux objectifs définis par l'*Advisory Council for Aeronautical Research in Europe* (équivalent Européen de la NASA) [161, 162]. L'objectif de cette approche est de pouvoir accélérer le processus de conception en automatisant les tâches non-créatives et répétitives, avec travers deux outils : l'*Initiator* et le MMG (Générateur multi-modèles ou *Multi-Model Generator*). Ce dernier sert à générer des modèles paramétriques pour accélérer les phases de modélisation. L'outil permet en théorie d'accélérer les phases d'exploration de l'espace des solutions, mais le temps de développement de ces modèles n'est pas discuté dans la méthode [90].
- KNOMAD (Enrichissement des connaissances pour l'analyse et la conception multidisciplinaires optimales ou *Knowledge Nurture for Optimal Multidisciplinary Analysis and Design*) [163] est une méthode KBE qui a été développée dans l'optique de pallier les défauts des méthodes MOKA et DEE. Le processus KNOMAD se décompose en six étapes (*Knowledge capture- Normalization- Organisation- Modeling- Analysis- Delivery*), et est un mélange de la formalisation des connaissances de l'approche MOKA et de l'utilisation des modèles d'ingénierie proposés par DEE.

Les méthodes citées intègrent les caractéristiques suivantes dans leur processus, qui permettent de définir les principales fonctions que doit remplir une méthode KBE. Sur la base des méthodes KBE étudiées, nous avons identifié les trois composants suivants :

- **Un processus de capitalisation, formalisation et de distribution des connaissances** pour constituer les bases de connaissances en identifiant les connaissances importantes à capitaliser pour

répondre aux usages, dans une perspective de réutilisation des connaissances. L'étape de formalisation permet de passer d'une forme tacite à une forme explicite de la connaissance par son élicitation. C'est lors de ce processus que la gestion des connaissances est effectuée, ce qui induit de trier et mettre à jour les connaissances obsolètes, et préparer la diffusion des connaissances.

- **Des modèles de connaissance** sous diverses formes possibles. Ces modèles peuvent représenter un domaine de connaissance, à travers un MM ou autre modèle formel, ou bien des modèles paramétriques ou encore des méthodes. Ces modèles sont orientés vers la réutilisation des connaissances spécifiques à l'usage des activités métier.
- **Des outils d'analyse multidisciplinaires** servent finalement à réaliser le cas d'usage, donc les activités métier pour lesquelles la méthode KBE a été implémentée. Les cas usages sont en général des tâches répétitives et/ou à faible valeur ajoutée, et font appel aux modèles de connaissance instanciés et à d'autres outils (métier par exemple) pour répondre à des objectifs.

En considérant les différentes méthodes rencontrées dans la littérature, la question de l'adoption de ces approches et de leur implémentation dans des environnements industriels se pose [90]. L'évaluation et la quantification des gains qu'apportent les KBS sont des questions importantes pour juger de la pertinence du développement de ces outils. Ce dernier point est, comme nous le verrons dans la prochaine section, souvent laissé de côté dans les exemples d'implémentation de ces systèmes. La section suivante se concentre dans un premier temps sur les limites des approches KBE, identifiées dans la littérature sur les deux à trois dernières décennies, puis sur l'évaluation de la performance des implémentations KBE dans la littérature.

### 2.2.2 Limites et performances des approches KBE

En dépit des nombreuses propositions de méthodes KBE depuis plusieurs décennies, ainsi que leur implémentation sur divers cas applicatifs, ces approches demeurent encore mal formalisées et difficiles à appliquer pour des industriels. Les avantages de l'automatisation des tâches à faible valeur ajoutée et répétitives sont masqués par un certain nombre de verrous technologiques, dont la plupart sont identifiés depuis les années 2010 et ne sont toujours pas levés d'après Kügler et al. [89].

#### Limite 1 : la généralisation des démarches KBE

Une première limitation à l'adoption du KBE, appuyée par les applications implémentées dans la littérature scientifique, est la difficulté à réutiliser la démarche développée sur des cas applicatifs spécifiques (*case-based*) à d'autres applications. Les méthodes présentées dans la littérature sont soit trop théoriques pour fournir des indications claires sur la mise en œuvre de la méthode (comme MOKA par exemple), soit trop spécifiques à un cas applicatif pour pouvoir généraliser la démarche et les outils. Cela pourrait tendre à montrer que les méthodes existantes semblent limitées dans la pratique [90, 158], et que la structure théorique des approches KBE n'est pas encore suffisamment mature et formalisée. Le même constat a été déjà dressé par [163], qui observe un manque de normalisation dans les structures de données pour rendre (semi)-automatiques les échanges de données entre les différents

outils d'analyse (données, informations, ontologies, MMG et les outils d'ingénierie). Pour [158], les logiciels et outils de KBE sont trop pointus et spécialisés, ce qui nécessite des compétences de niche qui ne sont accessibles qu'à un nombre limité d'entreprises. Ils confirment également le développement généralisé d'applications sur des cas spécifiques, obligeant à reconstruire l'ensemble des outils à chaque nouveau cas applicatif. Une explication de cette absence de développement standard peut venir de la complexité théorique des méthodes (MOKA, KNOMAD, etc...) et de la difficulté à les automatiser [158].

### **Limite 2 : les développements en boîte noire**

Une autre limitation des applications KBE est causée par le développement en « boîte noire » [158], soit lorsque la connaissance formalisée n'est pas accessible par l'utilisateur, ou partiellement car non contextualisée. Ces approches bloquent alors l'ajout et le maintien à jour des connaissances par les utilisateurs finaux. Les auteurs soulignent que le verrou technologique à lever pour ce point réside dans la capacité à avoir une fonction « bidirectionnelle automatique » entre l'application et les connaissances. En théorie, cela permet de passer des outils d'ingénierie aux modèles de connaissance, et inversement, pour qu'ils soient validés, mis-à-jour et réutilisés [90]. Dans leur étude, Verhagen et al. constatent que les applications développées n'explicitent pas le lien entre la BDC ou les outils de PLM (Gestion du cycle de vie d'un produit ou *Product Lifecycle Management*). Enfin, une des problématiques principales causées par le développement en « boîte noire » est la transmission des connaissances : si les connaissances de l'application sont cachées sous une couche logicielle et qu'elles sont opaques à l'utilisateur, alors l'utilisateur ne peut pas réellement se les approprier et est limité par les capacités de l'IHM (Interface Homme-Machine ou *Human-Machine Interface*) [158]. A l'usage, cela risque potentiellement d'induire une perte de connaissances dans la justification de l'utilisation de certaines méthodes ou outils dans le temps, car les hypothèses ou limites d'utilisation restent une connaissance tacite complexe à formaliser complètement. La Rocca [138] et Stjepandic et al. [164] observent également ces développements en « boîtes noires » en empêchant toute interaction avec les bases de connaissances, ainsi que la maintenance et la transparence de la connaissance utilisée dans ces applications.

### **Limite 3 : la réutilisation des connaissances**

Le troisième défaut de ces méthodes est la difficulté à réutiliser la connaissance acquise, en particulier sur les applications développées en « boîte noire ». Une explication serait le manque de normes d'échange de données au sein des applications KBE [90], qui est directement lié au manque de normes autour de ces applications en général. L'amélioration de la transparence dans la communication entre l'application et les bases de connaissance peut favoriser la réutilisation, le partage et la maintenance des connaissances. La formalisation de normes pour la modélisation de la connaissance d'une part, et pour la construction des applications d'autre part permettrait d'aider le développement conceptuel de ce domaine [165]. Le sourçage des connaissances est également un point faible identifié des applications KBE [166]. Le sourçage est un support important pour la qualité des connaissances capitalisées ainsi que pour leur maintenance, et permet de tracer les informations importantes dont le contexte associé aux connaissances capitalisées : plus l'information est renseignée par son contexte et plus elle offre

de connaissances. Finalement, la gestion des connaissances dans le contexte des applications KBE est un verrou technique important à lever pour l'émancipation des systèmes KBE [158], dont un des leviers est la définition de normes adaptées. Des modèles de connaissance alternatifs comme les réseaux sémantiques ou les graphes conceptuels sont de bons candidats pour répondre à cette problématique d'après Quintana et al. [165], en particulier pour leurs capacités à inférer des connaissances, de façon analogue aux ontologies.

### Limite 4 : l'utilisation de l'intelligence artificielle

Enfin, un verrou technique fréquemment identifié dans la littérature pour le développement de systèmes KBE est l'utilisation d'IA [166, 158] pour automatiser les étapes de conception. L'IA est une piste privilégiée pour ses capacités à identifier des liens dans des ensembles de données corrélés par des liens non triviaux, mais son intégration est complexifiée par l'absence d'outils d'extraction automatiques de la connaissance (car la corrélation n'implique pas une causalité) ou encore par l'absence d'outils de conception basés sur l'extraction de ces connaissances. Les trois principales perspectives d'utilisation de l'IA qui ont été identifiées sont les suivantes :

- Capitaliser et réutiliser automatiquement la connaissance en identifiant des corrélations entre différentes variables. Ces capacités à trouver des corrélations sont cependant encore loin de fournir des arguments d'explicabilité sur les résultats, ce qui nécessite de traiter les résultats obtenus avec précaution car la corrélation des résultats n'induit pas la causalité [165].
- Enrichir et utiliser des informations non-structurées et structurées, en travaillant avec les deux formats, pour enrichir une BDC, commune dont le concepteur pourrait faire usage. L'utilisation d'une diversité de format et de connaissances pourrait aider à enrichir les modèles, comparativement à l'utilisation d'une seule source de données.
- Guider le concepteur dans le choix des outils ou des algorithmes sur la base de ce qui a déjà été produit et analysé [166]. L'algorithme doit agir comme un support de conception pour recommander les actions à réaliser, les données à utiliser ou encore aider à interpréter les résultats obtenus.

L'utilisation de ML (*Machine Learning*) ou d'IA dans les systèmes KBE ne sera pas traitée dans ces travaux. Cela représente toutefois une perspective pertinente, grâce à l'amélioration des modèles et à l'augmentation des puissances de calcul qui ont eu lieu depuis les premières analyses de l'état de l'art.

En plus des limites évoquées ci-dessus, plusieurs problématiques demeurent quant à l'évaluation de la performance des systèmes KBE.

### Identifier les situations pertinentes pour le développement d'approches KBE

Finalement, la mise en place d'un système KBE est complexe et son coût de mise en œuvre n'est pas négligeable, bien que très variable suivant les cas applicatifs, ce qui impose une réflexion avant

l'implémentation d'un tel système. Dans [149, 90], les auteurs soulignent le manque de cadre général pour permettre d'identifier les contextes dans lesquels l'implémentation de solutions KBE est pertinent. Par un raisonnement inverse, ils ont proposé les conditions spécifiques pour lesquelles il ne semble pas pertinent de développer ces systèmes en raison de la perte, ou l'absence de gain, de performance que ça apporterait, parmi lesquelles :

- Les tâches de conception sont simples et résolubles avec moins de ressources qu'avec une approche KBE ;
- L'entreprise n'a pas les ressources, les moyens ou le temps de déployer un système ou une approche KBE ;
- La phase de conception requiert de la créativité ou de grandes variabilités en termes de personnalisation et de conception ;
- Il n'y a pas de connaissances disponibles pour l'objectif souhaité ;
- Le processus lié au KBE n'est pas clairement formalisé ;
- La technologie évolue trop rapidement.

Dans le cas de l'entreprise Nexteam Group, le développement de lignes et d'arbres de transmission ne rentre pas dans les catégories identifiées ci-dessus. Par exemple, les activités de conception ne sont pas triviales à réaliser et la technologie n'évolue pas trop rapidement car les développements de systèmes dans le secteur aéronautique se font sur des temps longs. Il n'y a donc pas de contre-indication identifiée pour le développement d'une approche KBE.

L'identification des cas où l'implémentation d'un KBS est pertinente est rarement traitée dans la littérature scientifique, et dans le pire des cas les industriels évaluent mal les coûts inhérents au développement et à la maintenance de ces applications comparativement aux gains apportés [90]. L'analyse des gains et coûts induits par le développement de ces méthodes dans la littérature scientifique est abordée dans la prochaine sous-section par l'étude des différentes applications implémentées.

### **Quantification des coûts et gains des approches KBE dans la littérature**

Nous nous intéressons ici plus précisément au verrou de la mesure de coûts et gains apportés par les approches KBE. Les systèmes KBE sont implémentés dans la littérature scientifique depuis plusieurs décennies avec pour objectif de réduire les temps et les coûts de développement produit. L'analyse de la littérature scientifique sur la décennie qui a suivi les travaux de [90], réalisée par Kügler et al. entre 2012 et 2021 [89], met à jour l'état des connaissances scientifiques concernant l'évaluation des coûts et gains des approches KBE. Les conclusions de l'analyse des derniers travaux d'implémentation de systèmes KBE par [89] sont similaires à celles déjà obtenues par [90] dix ans plus tôt. Sur les 37 cas d'études qu'ils ont étudiés, seuls 25 (67 %) font état d'un gain de temps ou de coût associé à l'utilisation d'un système KBE et dans le corpus documentaire de 78 documents 67 articles, soit 86 %, ne mentionnaient aucune évaluation quantitative : les auteurs en concluent que la recherche

académique n'a pas démontré d'améliorations significatives sur l'évaluation quantitative d'une implémentation KBE. Cette absence d'évaluation pourrait s'expliquer par la difficulté d'évaluer les impacts sur des cas d'études industriels concrets en raison des problématiques liées à la propriété intellectuelle, à la confidentialité des données ainsi qu'aux sources de financements, mais également à cause de la différence de temporalité entre les projets industriels et les études scientifiques. En effet, les projets peuvent s'étendre sur plusieurs années, en particulier dans les secteurs aéronautique ou spatial, ce qui rend l'évaluation des gains apportés par des systèmes KBE. En plus du temps long de la mesure, il est également difficile de parvenir à isoler les différents facteurs qui vont influencer les grandeurs mesurées.

Dans la poursuite des démarches de [90] et de [89], nous avons identifié 49 cas d'études d'implémentation de systèmes KBE dans la littérature scientifique. Un corpus initial a été constitué à partir des cas d'études relevés dans les travaux de [89], auquel ont été ajoutés de nouveaux cas d'études identifiés sur les bases documentaires (Scopus par exemple) sur la base des mots-clés comme « knowledge-based engineering », « knowledge based engineering », « KBE » ou encore « knowledge-based system ». Ces cas d'étude sont synthétisés dans le tableau 2.2 ci-dessous, et les caractéristiques suivantes sont évaluées :

- **Autom.** est cochée si l'implémentation est assimilée à de l'automatisation de conception, par exemple à travers l'automatisation de la génération de modèles (comme le MMG) ou de l'analyse.
- **Gain temps** est cochée si les auteurs indiquent un gain de temps ou de coût grâce à l'utilisation du système KBE développé.
- **Durée de dév.** est cochée si la durée d'implémentation de l'outil KBE est relevée.
- **ROI** est cochée si un calcul de ROI du développement de l'outil KBE est présenté, c'est-à-dire qu'un gain est confronté à un coût d'obtention.
- **Protocole mes.** est cochée si le protocole de mesure de la performance est détaillé (valeurs mesurées, reproductibilité, CdCF, etc...).

TABLE 2.2 – Différentes implémentations KBE dans la littérature

Réf.	Année	Autom.	Gain temps	Durée de dév.	ROI	Protocole mes.
[167]	2024	X	-	-	-	-
[168]	2024	X	X (>99 %)	-	-	-
[169]	2024	X	-	-	-	-
[170]	2023	-	-	-	-	-
[171]	2023	-	X (40 %)	-	-	-
[172]	2022	-	-	-	-	-
[173]	2022	-	-	-	-	-
[174]	2021	X	-	-	-	-

Suite en page suivante

## 2.2. L'INGÉNIERIE BASÉE SUR LA CONNAISSANCE

---

Table 2.2 – suite

Réf.	Année	Autom.	Gain temps	Durée de dév.	ROI	Protocole mes.
[175]	2021	-	X (92 %)	-	-	-
[176]	2020	-	X (76 %)	-	-	-
[177]	2020	-	X (50-75 %)	-	-	-
[178]	2020	X	-	-	-	-
[179]	2019	X	-	-	X	-
[180]	2019	-	-	-	-	-
[181]	2019	-	-	-	-	-
[182]	2018	-	-	-	-	-
[183]	2018	-	X (99 %)	-	-	-
[184]	2018	-	-	-	-	-
[184]	2018	X	-	-	-	-
[185]	2019	-	X (90 %)	X	-	-
[140]	2018	-	-	-	-	-
[186]	2018	-	-	-	-	-
[187]	2018	X	X	-	-	-
[188]	2018	-	X (90 %)	-	-	-
[189]	2017	-	X (85 %)	-	-	-
[190]	2017	-	X (90 %)	-	-	-
[191]	2017	X	-	-	-	-
[141]	2017	X	-	-	-	-
[192]	2017	X	-	-	-	-
[193]	2017	X	-	-	-	-
[194]	2016	-	-	-	-	-
[195]	2016	X	X (>99 %)	-	-	-
[196]	2016	X	X (30 %)	X	X	-
[197]	2016	X	X (75-85 %)	-	-	-
[198]	2015	X	-	-	-	-
[199]	2014	X	-	-	-	-
[200]	2014	X	-	-	-	-
[201]	2015	X	-	-	-	-
[202]	2015	-	-	-	-	-
[203]	2015	X	-	-	-	-
[204]	2013	X	-	-	-	-
[205]	2013	X	-	-	-	-
[206]	2013	X	-	-	-	-
[207]	2011	X	X (60-71 %)	-	-	-
[208]	2009	X	X (93 %)	X	X	-
[209]	2008	X	-	-	-	-
[210]	2008	X	X(95 %)	-	-	-
[211]	2007	X	X(75 %)	X	X	-
[212]	2005	X	X (80 %)	-	-	-

Les gains et les coûts d'implémentation de l'outil peuvent être d'ordre financier et horaire. Pour la mesure du gain, la mesure des durées des activités est l'indicateur le plus simple à implémenter devant la mesure du coût ou de qualité de chaque activité. Le gain financier est complexe à quantifier car il est difficile d'estimer le gain financier que peut apporter l'amélioration de la qualité du produit conçu avec des outils plus performants, qui peuvent offrir un produit de meilleure qualité à temps de développement équivalent. Pour ces raisons, nous nous concentrons sur les indicateurs de gain de temps de développement. Pour ce qui est du gain (horaire ou financier), il est généralement mesuré à l'échelle d'une activité de conception.

Sur les 49 cas d'étude identifiés 28, soit 57 %, implémentent une solution KBE avec une forte dominante dans l'automatisation de conception, principalement axée sur la génération de modèles CAO mais également de modèles éléments finis. La majorité, si ce n'est l'ensemble, des articles du corpus vont énoncer les gains de temps et de coûts qu'apportent les systèmes KBE, mais seuls 19 (40 %) annoncent des gains de temps chiffrés, allant en général de 30 % jusqu'à plus de 90 % pour la majorité. Ces chiffres ne tiennent pas compte des avantages indirects qui sont offerts par l'utilisation d'un système automatisé. En effet, les économies directes de temps pour une activité spécifique peuvent être utilisées pour réduire le coût final de développement du produit du point de vue des heures d'ingénierie, mais elles peuvent également être utilisées pour améliorer la qualité générale ou ajouter des fonctionnalités au produit développé [208, 207]. Le coût est souvent quantifié d'un point de vue temporel, via des unités de mesure en homme-mois ou homme-jour : dans le corpus d'étude, 4 publications sur les 48, soit 8 %, ont quantifié le temps nécessaire au développement de l'outil par cette méthode. Ce coût horaire, qui peut être converti sans problème en un montant financier, est en général soumis à plusieurs hypothèses simplificatrices sur le coût final de l'outil : les coûts liés à l'infrastructure informatique à déployer sont négligés (souvent considérés comme de la ressource interne à disposition) tout comme le besoin d'évolution et de maintenance de la partie logiciel qui ne sont pas pris en compte. Les publications qui ont réalisé un calcul du coût de déploiement de l'outil ont également poussé la réflexion jusqu'au calcul du ROI pour estimer l'intérêt d'implémenter ces outils dans des environnements industriels. Ce sont donc seulement 8 % des études qui ont estimé le ROI de l'implémentation, généralement quantifié autour des 30 %.

L'étude la plus complète du point de vue de l'évaluation quantitative des coûts et gains d'un système KBE est réalisée par Corallo et al. en 2009 [208]. Ils détaillent cinq indicateurs pour la mesure de la performance du système KBE séparés en deux catégories, les indicateurs de complexité dans un premier temps (les trois premiers) et les indicateurs de temps ensuite (les deux derniers) :

- **Le nombre d'activités** : indique le nombre d'activités présentes dans le processus de développement.
- **Le nombre d'activités, jointures et séparations** : prend en compte le nombre d'activités, mais également le nombre de jointures et de séparations dans le processus de conception.
- **Le nombre de décisions dans le processus** : compte le nombre de décisions prises dans le processus de contrôle.

- **Le temps de conception :** correspond au temps total requis pour la création d'un modèle de contexte.
- **Le temps annuel requis :** est le temps moyen requis sur une année pour préparer les modèles de contexte associés au développement de produits. Il est obtenu en multipliant le temps de conception par le nombre de produits conçus durant une année et le nombre d'itérations par produit.

Le ROI est calculé en utilisant le temps de développement de l'outil KBE. Huit outils ont été implémentés sur une durée totale de 31.5 mois, et l'application considérée pour le calcul a nécessité 1 mois (soit 3.2 % du temps total d'implémentation) pour être développée. Le temps nécessaire pour acquérir les connaissances propres au développement des applications KBE est de 2 mois, ce qui correspond à 1.3 jour au prorata du temps passé pour les huit applications. Au final, le temps total de développement est estimé à 21.3 jours (un mois correspondant à 20 jours dans l'étude). Sur la base de quelques hypothèses, comme un salaire équivalent entre les ingénieurs logiciels et ingénieurs conception, l'absence de coûts d'intégration logicielle ni d'amélioration des infrastructures logicielles, alors le ROI annuel est estimé à 36 %. Cela représenterait une économie de 7.6 jours du temps d'un ingénieur conception pour un investissement initial de 21.3 jours d'ingénierie logicielle. Les auteurs ont également réalisé une étude complémentaire sur l'implémentation d'un autre outil au sein de la même entreprise [207] mais ne citent cette fois que les gains en temps, en omettant le calcul du coût de développement de l'outil et l'analyse du ROI.

Les travaux d'Ascheri et al. [196] font également une analyse de ROI sur l'implémentation d'un système KBE, qui atteint le même ordre de grandeur que pour les travaux de [208] soit 30 %. Le temps de développement de l'application est estimé à 3 mois pour le développement d'un produit, et l'extension de ce système à une gamme de produits plus large nécessiterait jusqu'à 27 mois. Partant de ce constat, les auteurs estiment à 9 mois le temps gagné par l'utilisation de leur système, bien que ni le processus ni les indicateurs utilisés pour la mesure des durées ne sont détaillés. Certains coûts sont difficiles à estimer comme le coût logiciel ainsi que des infrastructures informatiques à déployer, la courbe d'apprentissage liée à l'utilisation de nouveaux outils et enfin les coûts de maintenance de la BDC. L'implémentation et utilisation d'un KBS offrent également des avantages indirects difficiles à mesurer : le temps gagné par l'utilisation de ces outils est réinvesti dans de nouvelles fonctionnalités ou dans l'optimisation du produit afin d'améliorer la qualité finale de la conception.

De même, Emberey et al. [211] synthétisent leurs résultats sur l'implémentation d'un système KBE pour la conception de panneaux de revêtement de fuselage en laminés fibro-métalliques. Les auteurs annoncent le temps de développement de l'outil ainsi que le temps de conception afin de pouvoir estimer un ROI, bien que ce ne soit pas explicitement énoncé, basé sur le nombre de cycles de conception à réaliser afin d'absorber le coût de développement de l'outil.

En revanche, malgré les efforts réalisés par ces auteurs pour proposer une analyse complète des coûts et des gains offerts par l'implémentation de ces outils, les indicateurs et le protocole de mesure utilisés ne sont pas explicités. Sur l'ensemble de notre corpus d'étude, seuls les auteurs de [208]

ont proprement formalisés les indicateurs utilisés, et aucune publication ne formalise le protocole de mesure. Conformément aux recommandations proposées dans le cadre du DRM [6], la mesure de la performance va passer par l'identification du protocole de mesure utilisé pour comparer une situation actuelle par rapport à une situation souhaitée. Dans notre cas, nous cherchons à comparer le processus de conception sans utiliser d'outil KBE, la situation actuelle (*as-is*), avec le processus de conception qui intègre cet outil, donc la situation souhaitée (*to-be*). C'est en comparant rigoureusement ces deux processus que l'impact de l'outil peut être quantifié, ce qu'aucune publication n'a proposé en l'état. Des propositions ont été faites sur des indicateurs et des mesures de divers coûts et gains des outils, mais le protocole de mesure et les processus utilisés ne sont jamais explicités. Enfin, un inconvénient majeur induit par cette absence de protocole est l'impossibilité de reproduire les résultats de recherche obtenus sur les implémentations de ces outils KBE

Finalement, le développement des KBE se heurte en général à la question de la performance et du gain que les entreprises peuvent en tirer. Ces solutions nécessitent le développement de BDC, qui seront à connecter aux outils métier, ce qui représente un coût difficile à anticiper pour des gains incertains. L'analyse des travaux dans la littérature confirme la difficulté à analyser les ROI espérés pour de tels systèmes, avec une minorité des travaux analysés qui essaient de quantifier cette donnée. Il en est de même pour la quantification des gains de performance que les approches KBE peuvent apporter : aucun travail n'a proposé de protocole ou de système de mesure pour répondre à ces questions, ni même de système de mesure plus complet qu'un indicateur de ROI.

Dans ce contexte, la suite de l'état de l'art se concentre sur l'état de l'art des indicateurs sur les différentes caractéristiques d'un PDP : les activités de conception, les activités de capitalisation et de gestion des connaissances, et enfin les outils métier. L'étude des indicateurs de ces trois composantes, étudiées séparément, constitue une base pour l'établissement d'un système de mesure de la performance des méthodes KBE.

### 2.3 Mesure de la performance développée

Cette section dresse un état de l'art sur les différents indicateurs, les KPI, utilisés pour quantifier la performance d'un PDP. Il a été démontré précédemment que les gains annoncés par l'implémentation de KBS ne sont pas quantifiés par l'utilisation d'indicateurs, ou bien sommairement par l'identification du gain de temps et du temps de développement pour aboutir à un calcul de ROI. L'objectif est d'identifier les principales métriques utilisées aux différents niveaux d'un PDP (activités métier, activités de capitalisation, outils métier), afin de constituer les bases d'un système de mesure qui intégrerait des indicateurs capables de mesurer la performance apportée par l'intégration de systèmes KBE en tant que ressource pour les activités métier.

La mesure de la performance d'un processus est importante pour aider à identifier les leviers sur lesquels agir afin d'améliorer la performance des critères suivis. Le choix des indicateurs se fait au regard des informations que l'on souhaite obtenir, donc la construction des indicateurs doit être en accord avec le contexte organisationnel et les objectifs de l'entreprise [213, 214]. Les principales recommandations proposées pour identifier les critères de performance [215], et donc par induction les indicateurs, sont :

- Les critères de performance doivent être issus des objectifs de l'entreprise ;
- Les critères de performance permettent la comparaison de deux organisations concurrentes (sur un même marché) ;
- L'objectif du critère de performance est clairement identifié ;
- Les données à recueillir et les méthodes d'obtention sont explicites ;
- Les critères de performances objectifs sont préférés aux subjectifs ;
- Les valeurs des critères de performance doivent être égale, ou au moins quasi-égales, pour des performances égales.

La difficulté dans la définition des KPI réside dans le besoin de mesurer une information qui permet de répondre à un objectif identifié. La définition d'objectifs SMART est une approche concise pour identifier et définir les indicateurs à implémenter [216]. L'acronyme SMART signifie :

- Spécifique (*Specific*) : définition d'un objectif précis auquel l'indicateur doit répondre.
- Mesurable (*Measurable*) : identification des éléments relatifs à la mesure de l'objectif (données, moyen de mesure, protocole, etc...).
- Atteignable (*Achievable*) : validation des objectifs en accord avec les moyens et délais à disposition.
- Réaliste (*Relevant*) : validation de la difficulté et de la pertinence des objectifs.
- Temporellement défini (*Timely*) : identification du cadre temporel (fréquence de mesure, début et fin de la mesure).

Les KPI sont mesurables sur plusieurs dimensions d'un PDP. Les premières sont en général à l'échelle du processus (qualité, robustesse, sécurité, complexité, collaboration, planning, etc...) et du produit (valeur ajoutée, qualité, recyclabilité, maintenance, etc...) [217], mais il existe aussi des dimensions projet (coût, innovation, intégration, etc...) ou encore système (coût, fonctionnalité, modularité, intégration, etc...).

## 2.3. MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

La sélection des KPI peut se faire à différents niveaux de granularité durant le cycle de vie d'un produit et d'un processus de développement. Dans notre contexte d'étude, il est pertinent d'étudier les KPI d'un processus macroscopique, c'est-à-dire à l'échelle d'un processus ou sous-processus, pour obtenir des informations sur la performance « globale ». Il est également pertinent d'étudier la performance à l'échelle des activités métier, réalisée sur les tâches de conception, donc à l'échelle « locale ». Puis, dans un contexte de mesure de la performance liée à l'utilisation d'outils KBE, les indicateurs de performance relatifs à l'implémentation de la solution et à l'automatisation des tâches sont privilégiés. Enfin, vient l'analyse bibliographique des indicateurs associés à la capitalisation et la gestion des connaissances dans un contexte de développement de produits. Ainsi, les KPI des trois composants du PDP étudiés, identifiés sur la figure 2.8 (version simplifiée de la figure 2.1 présentée au début du chapitre 2), sont analysés dans leur ensemble, pour ensuite en extraire ou adapter ceux qui vont servir à quantifier la performance du PDP qui intègre un système KBE. Dans ces travaux, la mesure de la performance est exclusivement tournée vers les processus et non vers les produits. En effet, il existe déjà un grand nombre d'indicateurs et d'études orientés en ce sens, et nous prenons donc en hypothèse que la qualité est correcte et constante. Nous considérons que les spécifications du CdCF sont respectées. Il est bien sûr possible d'étendre le système de mesure qui sera proposé pour intégrer ces indicateurs, mais ce n'est pas l'objet de ces travaux.

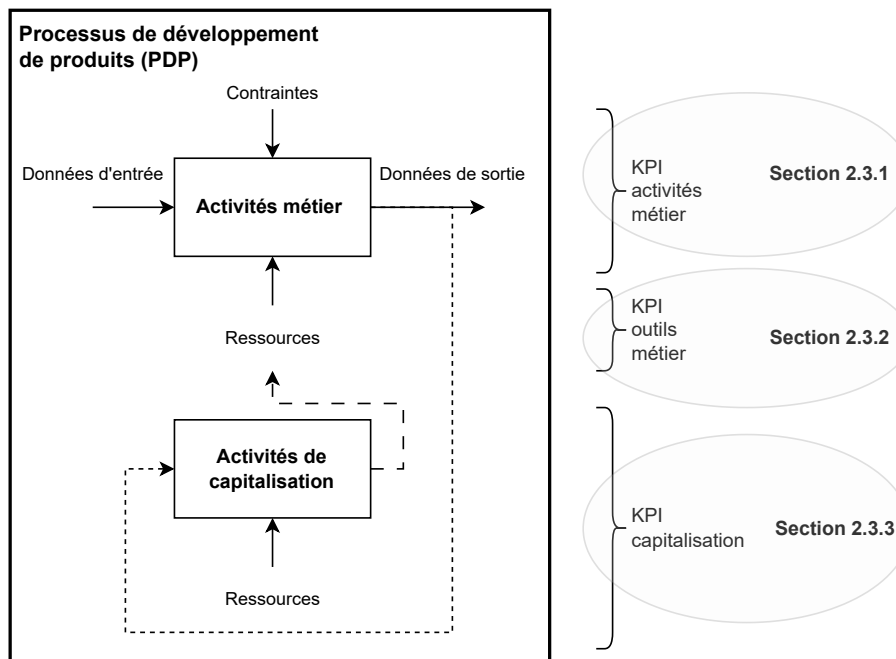


FIGURE 2.8 – Structure de la section sur l'analyse des indicateurs du PDP

### 2.3.1 Indicateurs de performance des activités métier

Les KPI sont principalement utilisés pour mesurer la performance du processus de façon globale, à l'échelle macroscopique, car ces métriques sont plus simples à mesurer qu'à une échelle plus locale, au niveau de l'activité. Partant de ce constat, les indicateurs les plus fréquemment utilisés sont articulés autour des trois dimensions du triplet « coût, qualité et délais » [218]. Ces trois éléments représentent à la fois les contraintes du projet, mais également un vecteur de mesure à comparer à cet objectif prédéterminé.

- **Coût** : le coût du PDP est un indicateur clé dans le développement de produits puisqu'il définit également le prix de vente pour permettre de dégager une marge. Le suivi des coûts est fait tout au long du projet pour tracer les dépenses et recettes de permettre le pilotage du projet en fonction du budget prévu. Les coûts sont souvent catégorisés comme « récurrents » ou « non récurrents » dans les projets d'ingénierie. D'après Wikipédia, les charges non récurrentes désignent « les coûts uniques liés à la recherche, à la conception, au développement, aux essais et/ou à l'amélioration d'un produit. Ces coûts [...] comprennent les salaires du personnel du projet, tous les matériaux pour les prototypes, la production des prototypes, la fabrication des produits d'essai, les essais des produits et tous les gabarits et montages consacrés aux essais ». À l'inverse, les charges récurrentes sont des dépenses qui seront à réaliser de façon cyclique comme la masse salariale, les opérations de maintenance, la location de licences pour des logiciels ou encore les consommables.
- **Qualité** : la qualité correspond au respect du niveau d'attente de chaque composant du projet, que ce soit le client final ou l'ensemble des collaborateurs et intermédiaires travaillant sur le projet. Cela inclut de fournir le niveau de qualité attendu pour les l'ensemble des livrables (dont les produits fabriqués, les documents et rapports techniques et les organisationnels).
- **Délais** : la dernière contrainte du triplet concerne le temps passé sur le développement. C'est une donnée qui peut s'obtenir simplement par les relevés des temps de début et de fin des activités réalisées pour atteindre un objectif. Les principales mesures de temps sont réalisées par les revues techniques des projets, mais la granularité des mesures doit être adaptée à chaque jalon et objectif.

Ce triangle coût-qualité-délai aide à positionner un projet et le pilotage de ce dernier en fonction des objectifs identifiés. Une grande partie du pilotage industriel est assuré par les indicateurs financiers, à travers le contrôle de gestion, mais également les KPI liés au délai et à la qualité des produits livrés. Ces mesures renseignent sur la performance du processus par rapport aux objectifs initiaux de coûts (définis de façon à dégager une marge positive), de temps ou délais (qui peuvent conditionner des pénalités de retard ou des contraintes d'approvisionnement par exemple) et enfin de qualité (par rapport aux spécifications du CdCF). Comme cela a été précisé dans l'introduction, les contraintes environnementales sont de plus en plus considérées dans le secteur aéronautique. Ainsi, de nouveaux critères de mesure sont susceptibles de venir enrichir le périmètre de la qualité. Des critères sur les impacts environnements des produits et matériaux utilisés peuvent intégrer les spécifications des produits, et à l'échelle du processus ce sont les émissions de CO<sub>2</sub> qui peuvent être considérées. À l'échelle de ces travaux, nous nous concentrerons dans un premier temps sur les performances du point de vue

### 2.3. MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

des coûts et délais, et laissons en perspective la possibilité d'enrichir le système de mesure avec les considérations de qualité et d'éco-conception des produits et des processus.

De multiples indicateurs de performance du PDP sont dérivés des trois principales grandeurs pour capter différents aspects de la performance du processus. Il est possible de retrouver la performance budgétaire, qui traduit l'écart entre le budget initialement prévu pour le projet et le budget finalement alloué [20], ou encore le retard de livraison des livrables entre la date de livraison prévue et la date de livraison effective [219]. Un indicateur intéressant à l'échelle du PDP est le délai de réponse à un appel d'offres [220] sur lequel l'utilisation de systèmes KBE peut apporter un gain de performance très concret.

TABLE 2.3 – Indicateurs de performance du processus de développement de produits

Mesure	Description de la métrique	Références
Coût du PDP	Coût total des activités pour la mise en œuvre complète du PDP.	[219], [221]
Temps du PDP	Temps total des activités pour la mise en œuvre complète du PDP.	[219], [221]
Qualité finale	Nombre de spécifications remplies comparativement au nombre de spécifications globales dans le délai imparti.	[220], [219], [20]
Temps de validation d'un produit	Temps passé entre la demande et la validation, en unité de temps.	[221], [222]
Temps de validation d'une modification de produit	Temps passé entre la demande et la validation, en unité de temps.	[221], [222]
Retard	Nombre de jour (ou autre unité de temps) de retard par rapport à la date de livraison prévue du produit.	[219], [222]
Performance budgétaire	Coût du travail prévu divisé par le coût du travail réalisé	[20]
Délai de réponse à un appel d'offres	Nombre de jours (ou autre unité de temps) entre la réception de la demande de conception et la proposition chiffrée émise par l'entreprise.	[220]
Structure du processus de conception : taille et densité	Nombre de domaines, de nœuds, de branches, de classes, d'interfaces entre domaines, de branches par nœud et de nœuds non connecté.	[223]
Structure du processus de conception : chemins	Nombre de chemins, longueur des chemins et poids des branches.	[223]
Structure du processus de conception : cycles	Nombre de cycles, nombre de cycles par nœud, nombre de cycles par branche, nombre de rétroactions ou encore nombre de départs d'itération.	[223]

Suite en page suivante

### 2.3. MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

Table 2.3 – Suite

Mesure	Description de la métrique	Références
Niveau de satisfaction des spécifications	Somme, pour chaque spécification, de la difficulté de la spécification multipliée par le degré de conformité de cette spécification. La difficulté et la conformité sont quantifiées entre 1 et N, et l'indicateur final peut ensuite être normalisé entre 0 et la valeur théorique maximale.	[224], [225]
Eco-conception	Nombre de rebuts. Choix des matériaux (toxicité, recyclage, etc...) et nombre de matériaux différents. Energie consommée pour la production. Durée de vie. Pourcentage de matériaux recyclables ou réutilisables, par rapport au poids total du produit.	[226], [227], [228], [229], [230]

D'autres dimensions de l'analyse du processus de conception peuvent passer hors du triplet coût-qualité-délai, avec notamment l'analyse du processus comme un réseau de nœuds et de branches, respectivement les activités et la chronologie des activités. Kreimeyer et Lindemann [223] proposent plusieurs indicateurs en ce sens pour caractériser la taille, la densité ou encore les chemins et cycles principaux. Ces indicateurs permettent, comme les travaux de [231] ou de [232], d'analyser l'impact d'un changement de structure du processus de conception sur la performance finale. L'identification de cycles ou de boucles de rétro-action permet d'identifier les sous-processus clés qui représentent le cœur de l'activité de développement, ce qui permet aussi d'aider à positionner les points de contrôle important pour vérifier les performances locales des activités et sous-processus. L'utilisation de KPI sur l'éco-conception ou les impacts sociaux du processus sont également de plus en plus considérés dans le développement de produits en industrie, avec par exemple [226, 227, 228, 229, 230].

Sur la figure 2.9, issue des travaux de recherche de Cedergren [18], la performance est déclinée en trois dimensions : la stratégie associée au produit (ou stratégie produit), la gestion du projet et les activités de développement. La considération de ces trois dimensions permet de considérer la performance globale du PDP. Les indicateurs de l'efficacité sont notés avec un  $E$  majuscule ( $E_{ps}$  traduit l'efficacité de la stratégie produit par exemple) tandis que les indicateurs d'efficience sont notés avec un  $e$  minuscule. Enfin, les inconnues du processus (*knowledge gap*) sont référencées par un  $K$  majuscule,  $K_{ps}$  représente donc les incertitudes dans la stratégie produit, et cela traduit les écarts de connaissances et de méthodes entre les objectifs de l'activité et les éléments qui vont être utilisés comme données d'entrée au processus. Plus cet indicateur d'incertitude est élevé et plus l'efficacité et l'efficience du processus risquent d'être impactées par un écart entre les connaissances requises et l'état initial des connaissances. La stratégie produit est la première facette de la décomposition proposée dans le modèle de critères de performance, et ce modèle permet de formaliser le produit à développer et les raisons du lancement du projet. Le processus de gestion de projet permet de formaliser les besoins clients en spécifications, qui vont incarner les objectifs des activités de développement. Enfin, les activités de développement correspondent à l'ensemble des tâches à réaliser pour obtenir le produit fini qui répond aux spécifications. Le modèle de référence des critères de performance permet donc d'évaluer trois efficacités et efficience différentes tout en prenant en compte la part d'incertitude au niveau de la stratégie du produit, de la gestion de projet ainsi que des activités de développement.

### 2.3. MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

Enfin, l'efficacité  $E_{PD}$  et l'efficience  $e_{PD}$  sont calculées à l'échelle du PDP. L'efficacité est définie par le niveau de conformité des sorties des activités de développement avec les objectifs de la stratégie produit, tandis que l'efficience est définie par la différence entre les sorties des activités de développement de produits et les entrées de la stratégie produit, divisée par le total des ressources consommées lors de la stratégie produit, la gestion de projet et les activités de développement. L'auteur oppose son système de mesure de la performance au triptyque coût-qualité-délai, analysant une omission de l'efficience faite des ressources ainsi que de la valeur ajoutée de chaque activité dans la contribution au processus global.

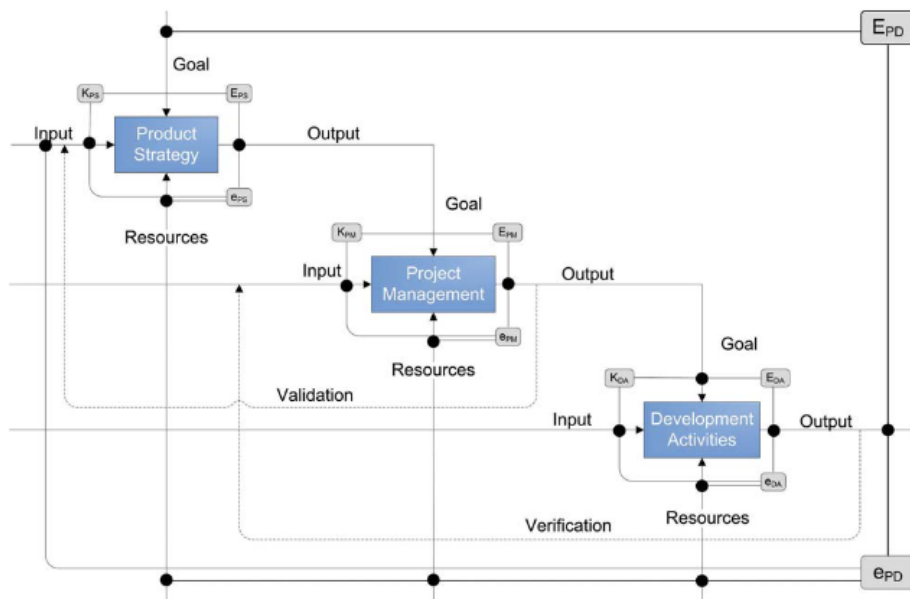


FIGURE 2.9 – Mesure de la performance d'un processus de conception (extrait de [18])

Les KPI présentés à l'échelle du processus renseignent sur la performance « finale » du PDP. Cette performance finale n'est cependant que l'image d'une combinaison des performances plus « locales », à l'échelle de l'activité - la réalisation d'une tâche spécifique du processus. La performance mesurée à cette granularité renseigne sur la qualité des méthodes et ressources déployées pour la mise en œuvre d'une action concrète. Le formalisme utilisé pour représenter ce niveau de détail dans la littérature scientifique est la représentation IDEF0 [35], comme dans les travaux de [16], de [17] et de [233].

À l'échelle d'une activité, représentée par un diagramme IDEF0, il a été précédemment introduit les notions d'efficacité et d'efficience en tant qu'images de la performance de l'activité par O'Donnell et Duffy, voir les figures 2.9 et 2.10. Pour rappel, l'efficacité est la différence entre les « sorties » et les « objectifs » de l'activité [16], et, l'efficience est la différence entre les « sorties » et les « entrées » de l'activité, divisée par le coût des « ressources » nécessaires à la réalisation [16]. Ces deux premiers indicateurs sont complétés plus tard par l'indicateur d'incertitude de Cedergren et al. [17, 18], qui représente la différence entre les « objectifs » et les « entrées » de l'activité. L'ensemble de ces indicateurs renseigne sur la « performance » à l'échelle de l'activité, mais également du processus (au sens d'un enchaînement d'activités).

### 2.3. MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

Ces trois indicateurs offrent des descriptions compréhensibles de ce que peut être la performance d'une activité, mais restent cependant théoriques. Comment comparer dans la même formule des « ressources » qui comprennent des logiciels, des ressources humaines, des méthodes industrielles ou encore du matériel de mesure avec des « entrées » ou des « sorties » exprimées en modèles numériques, données, résultats de calculs ? Pour cela, il faut parvenir à convertir l'ensemble de ces types de données sous un même format pour pouvoir ensuite les utiliser sous la forme d'un indicateur de performance. La procédure de conversion n'est pas explicitée dans aucune de ces études.

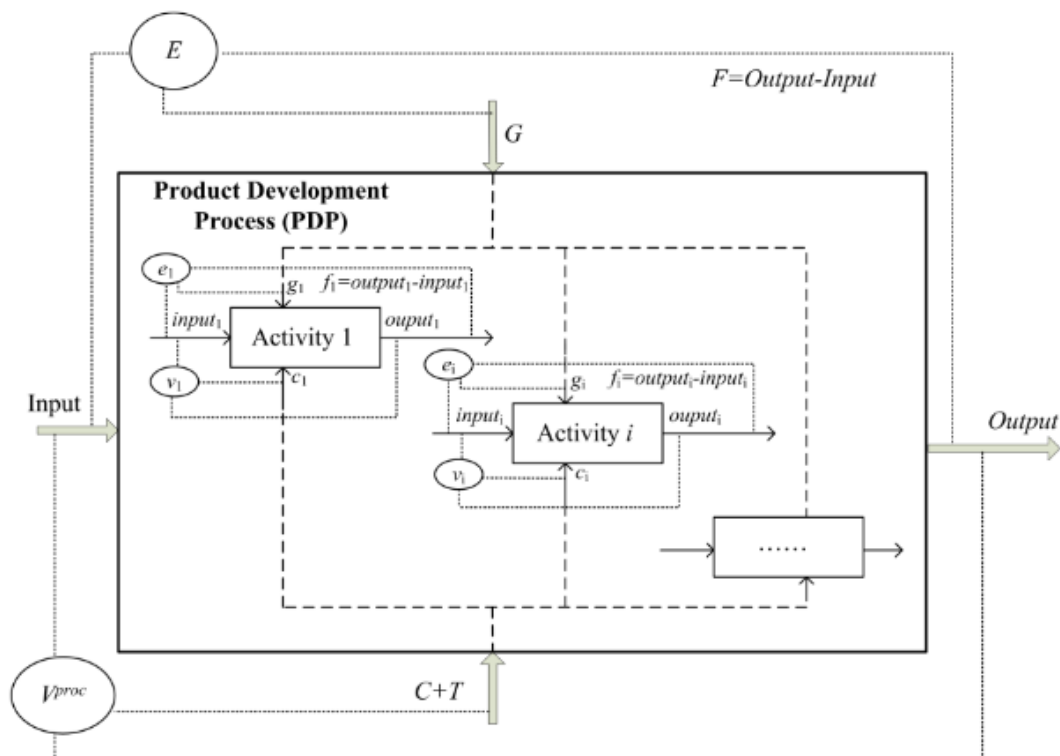


FIGURE 2.10 – Mesure de la performance des activités pour remonter à une performance du processus (extrait de [233])

Les travaux de Yin et al. [233] viennent compléter la liste des indicateurs possibles à mesurer autour d'une activité pour en extraire une mesure de performance. La figure 2.10 ci-dessous permet de visualiser l'ensemble des données impliquées et les métriques utilisées. Sur cette figure 2.10, on peut observer l'enchaînement des activités de façon à constituer un processus global. On peut remarquer que les sorties des activités ne constituent pas nécessairement les entrées des activités suivantes, et les activités suivent le formalisme IDEF0 avec, pour les ressources, la considération principalement du coût de l'activité  $i$ , noté  $c_i$ . Le coût d'une activité, ou du moins le coût des ressources nécessaires à la réalisation de l'activité, est un indicateur identifié par [234] et [222] à travers les indices  $C$  et  $c_i$ . L'objectif de leurs travaux est de quantifier la performance du PDP par l'intermédiaire de divers indicateurs, notamment le  $V^{proc}$  qui donne une valeur au processus de conception en fonction des caractéristiques suivantes :

### 2.3. MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

$$V^{proc} = \frac{G \times E}{\alpha_1 \times C + \alpha_2 \times T}$$

Avec G l'objectif final du processus, E l'efficacité globale du processus, C le coût en ressources total, T le temps total utilisé,  $\alpha_1$  le poids du coût et  $\alpha_2$  le poids du temps de développement dans la performance du processus. Ces deux derniers paramètres sont normés entre 0 et 1 et leur somme doit être égale à 1. Pour cela, les mesures de coûts, de durée et d'efficacité sont mesurées à chaque activité par les indicateurs en lettres minuscules, ainsi en prenant en compte les probabilités de devoir réaliser de nouveau une activité qui n'aurait pas totalement atteint ses objectifs (appelé *rework*). La combinaison des performances des activités permet de définir la performance du PDP représenté par des lettres majuscules sur le schéma 2.10. L'utilisation de ce système de mesure de la performance permet de comparer deux architectures de PDP entre elles pour déterminer celle qui répond le mieux à l'objectif de performance basé sur la combinaison des performances en coûts et en temps.

Le tableau 2.4 ci-dessous synthétise les principaux indicateurs d'une activité qui viennent d'être présentés agrégés à d'autres indicateurs plus classiques. On retrouve en premier lieu les indicateurs liés aux coûts de mise en œuvre de l'activité. Puis viennent différents indicateurs relatifs aux temps et délais de l'activité. La mesure du temps « brut » de l'activité est la plus simple à relever par les temps de début et de fin de l'activité. La mesure du temps « net » est plus complexe car le détail des perturbations, des recherches d'informations ou n'importe quelle autre sous-activité qui viendrait cannibaliser la tâche initiale n'est en général par mesuré - ni facilement mesurable - mais devraient être considérés dans l'idéal.

TABLE 2.4 – Indicateurs de performance des activités métier

Mesure	Description de la métrique	Références
Coût de réalisation	Ressources consommées pour réaliser la tâche.	[234], [222], [233]
Temps de réalisation « brut »	Temps passé sur la réalisation de la tâche en unité de temps.	[234], [222], [233]
Temps de réalisation « net »	Temps passé sur la réalisation de la tâche, en unité de temps, et en soustrayant les interruptions, la résolution de problèmes techniques, la recherche d'informations, etc...	[234], [222]
Retard	Nombre de jour (ou autre unité de temps) de retard par rapport à la date de rendu prévue de la tâche.	[219], [222]
Fonction du processus	Produit de l'efficacité (ici au sens du taux de validation des objectifs) de l'activité avec les objectifs de création de l'activité.	[233]
Valeur du PDP ( $V^{proc}$ )	Indicateur global lié aux coûts, aux délais ainsi qu'à la qualité du processus, mais également aux spécifications, aux probabilités de modifications ainsi qu'à l'architecture du PDP.	[233]

### 2.3. MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

Finalement, la mesure de la performance des activités métier se fait à travers deux niveaux. Un premier niveau est à l'échelle globale avec les KPI de processus dans leur ensemble comme le coût total, le temps total ou bien la qualité finale du produit. Un deuxième niveau d'analyse, local, est identifié à l'échelle des activités métier. Des indicateurs d'efficacité et d'efficience ont été identifiés, mais leur mise en œuvre n'a pas été démontrée autrement que d'un point de vue théorique. De plus, les indicateurs d'efficience sont difficilement comparables entre eux et les mélanges de grandeurs (coûts en temps et coûts financiers) ne sont pas directement comparables. D'autres indicateurs aident à étudier la performance du processus par la modélisation et l'analyse de réseaux ou graphes, mais cette approche n'est pas retenue dans la suite de notre travail en raison du prérequis de modélisation nécessaire avant de pouvoir quantifier une performance. La figure 2.11 synthétise les résultats de cette première sous-section sur les KPI des activités métier.

**KPI à réutiliser :**

- Processus globaux (coûts, délais, qualité). \*
- Efficacité. \*

**KPI à adapter :**

- Efficience.
- Performance globale ( $V^{proc}$ ).

\* : ces indicateurs ne seront pas appliqués dans le chapitre 4 sur la validation du système de mesure proposé en raison d'un contexte d'étude et d'implémentation large, un choix a été fait sur les indicateurs qui semblaient les plus pertinents pour l'analyse de la performance des systèmes KBE.

FIGURE 2.11 – Synthèse des KPI pour les activités métier

#### 2.3.2 Indicateurs de performance des outils métier

Cette sous-section, sur l'état de l'art des KPI des outils métier, est orientée sur l'étude de la performance des outils utilisés comme ressources des activités métier, ce qui inclut les outils KBE. Il a été vu dans la précédente section qu'il n'existe pas dans la littérature de système de mesure de la performance des outils KBE. Pour construire un système de mesure adapté, il convient donc d'identifier des KPI développés pour mesurer certaines caractéristiques de ces systèmes KBE : l'automatisation d'activités, la capitalisation et la réutilisation des connaissances. Les thématiques traitant de la connaissance sont développées dans la prochaine sous-section. Cette partie se concentre donc sur l'analyse de la performance des outils et également ceux qui supportent l'automatisation d'activités de conception.

L'automatisation des tâches de conception est une des composantes clés des systèmes KBE puisqu'elle permet d'accélérer la réalisation de certaines tâches, à l'instar de la méthode DEE présentée précédemment pour l'automatisation et la génération de modèles 3D d'avions ou de composants. Les principaux avantages de l'automatisation, dans un contexte de développement de produits, sont le gain

### 2.3. MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

de temps, l'étude de produits alternatifs à travers l'exploration de l'espace des solutions ou encore la réutilisation des connaissances d'ingénierie [235]. Verhagen et al. [84] notent cependant un manque de méthode pour aider à identifier les opportunités d'automatisation dans un contexte de développement de produits, mais également un manque de métriques pour quantifier les gains potentiels que pourrait offrir l'automatisation de certaines tâches dans un environnement industriel.

Pour aider à formaliser ces méthodes d'analyse du potentiel d'automatisation, Rigger et al. [222] identifient un ensemble d'indicateurs pour estimer l'impact et le potentiel de l'automatisation sur le processus de conception, et proposent une méthode basée sur l'utilisation d'un MM pour identifier le potentiel d'automatisation d'un processus grâce à l'utilisation de précédents travaux de [236], [237] et [179]. Van der Velden et al. [22] proposent également un indicateur simple, plus facile à implémenter qu'un MM, pour quantifier le potentiel d'automatisation d'une tâche de la façon suivante :

$$\text{ROI} = \frac{n \times T_M}{T_D + n \times T_A}$$

Avec  $n$  le nombre de réalisation estimée de la tâche,  $T_M$  le temps estimé pour réaliser la tâche manuellement,  $T_D$  le temps estimé pour automatiser la tâche et enfin  $T_A$  le temps estimé de réalisation de la tâche par la solution automatisée qui aura été développée. Lorsque le nombre d'itérations prévisionnel  $n$  est suffisamment important pour donner un ROI supérieur à "1", alors il est pertinent d'automatiser cette activité.

L'étude de Verhagen et al. [84] étudie les processus d'ingénierie dans leur ensemble, sans restriction au niveau du processus de conception, pour identifier les potentiels d'automatisation en analysant les pertes de temps (également associé à une perte d'information) au niveau des activités. Les travaux de Mulder et al. [238], inscrits dans la suite de ceux menés dans [239] et [84] sur l'optimisation du PDP, ont pour objectif d'identifier l'architecture du processus de développement de produits optimale au regard du délai (*lead time*), de la durée du processus, de son coût et du coût de l'investissement pour automatiser. Ces indicateurs, à l'exception du coût d'investissement, ont déjà été identifiés dans les tableaux de mesure de la performance des processus et des activités. Les valeurs d'indicateurs obtenus pour les différents processus simulés permettent d'identifier les activités clés sur lesquelles un investissement permet de dégager des gains intéressants par l'automatisation. Comme souligné par les auteurs, les indicateurs se concentrent principalement sur les coûts et les durées, au détriment de la qualité qui demeure difficile à mesurer.

Plusieurs études analysent également le processus de conception du point de vue de l'originalité et de la créativité des solutions. Il est plutôt admis que l'automatisation de la conception va emmener à une large production de modèles peu créatifs, mais le gain de temps apporté par ces solutions rapides permet d'explorer des variantes plus originales et/ou innovantes. Ainsi, les travaux de [219], [240], [241], [183] ou encore [242] permettent de qualifier la proposition de conception vis-à-vis de son originalité et de sa créativité. Costa et al. [219] développe un indicateur pour identifier la simultanéité des produits étudiés ou développés, ce qui permet d'étudier la créativité propre à chacun des concepts étudiés en parallèle.

## 2.3. MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

TABLE 2.5 – Indicateurs de performance des outils utilisés dans les activités métier

Mesure	Description de la métrique	Références
Coût d'investissement	Temps et/ou coûts nécessaires pour implémenter une solution automatisée.	[238]
Retour sur Investissement (ROI)	Quantification du nombre minimal de tâches à réaliser avec l'outil automatisé pour compenser son temps de développement au regard du gain de temps qu'il permet. Les paramètres $T_M$ , $T_D$ et $T_A$ doivent être exprimés dans la même unité, en général temporelle (jours ou heures). Une alternative est possible en utilisant des unités de coûts au lieu d'unités de temps.	[22]
Réduction des erreurs en conception	Nombre de produits validés, nombre de produits refusés, nombre de versions, nombre de plans validés, nombre de plans refusés.	[221], [219]
Taux de retraitement ( <i>re-work rate</i> )	Nombre de produits non conformes durant le processus par rapport au nombre de produits total.	[234]
Nombre de solutions développées en parallèle	Nombre de conceptions alternatives par activité de conception divisé par la moyenne du nombre de conceptions alternatives.	[219]
Nombre d'idées	Nombre total d'idées générées durant le processus de développement.	[240]
Diversité des idées	Nombre de solutions uniques.	[240]
Nouveauté et créativité des idées	Quantifie la rareté de l'idée. L'originalité peut se définir par un entier entre 1 et N qui sera multiplié à un critère de niveau de satisfaction des spécifications (présenté tableau 2.3), le tout donnant un critère de créativité et d'innovation.	[240], [241], [183], [242]
Complexités	Complexité structurelle, calculatoire, du comportement, logique et algorithmique d'un modèle de simulation.	[243]
Complexité structurelle	Nombre d'objets, nombre de connexions, nombre d'attributs, nombre d'attributs modifiés et nombre d'attributs non-hérités.	[244]
Complexité logicielle	Complexité/nombre cyclomatique, longueur du programme (en lignes de codes) et complexité de calcul.	[244]

La complexité de réalisation d'une tâche est un paramètre important à prendre en compte dans la perspective d'automatiser cette activité. En effet, plus il est « difficile » de réaliser une action, et plus la difficulté de développement d'un outil automatisé risque d'augmenter. Un exemple intuitif peut être donné par la génération de modèles CAO : plus le modèle possède une géométrie simple, c'est-à-dire des formes relativement rectilignes avec peu de courbures, et plus il sera simple à générer par un outil métier, mais dès que les éléments de construction de la géométrie se multiplient il devient difficile d'automatiser un outil qui puisse conserver le maximum de degrés de liberté tout en réduisant fortement le besoin de manipulation humaine. Ghasemi et al. [243] proposent d'évaluer la complexité d'un modèle de simulation par rapport aux caractéristiques de « complexité structurelle », de « complexité calculatoire », de « complexité du comportement » et de « complexité logique et algorithmique ». Pour réaliser le calcul de complexité et pouvoir comparer les différents modèles entre eux, le modèle de

### 2.3. MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

simulation est converti en un MM dont la fonction est de pouvoir être transformé en un graphe orienté qui permet l'extraction des caractéristiques du modèle de simulation. Finalement, la comparaison de matrices de mesures extraites de l'ensemble des graphes orientés permet la comparaison et le choix d'un modèle de simulation adapté au besoin initial. La complexité d'un modèle peut aussi être étudiée par rapport au nombre d'entrées et de sorties de ce dernier, ainsi que par les différents « nœuds » qui sont impactés par les résultats obtenus, lorsque le PDP est formalisé sous la forme d'un graphe. Ce type d'approche est proposé et formalisé dans les travaux de Kreimeyer et Lindemann [223], déjà référencés dans le tableau 2.3.

D'autres études considèrent la complexité, en particulier dans les modèles de simulation, comme [244], [245], [246] ou [247]. Popovics et Monostori [244] décomposent la complexité comme structurelle et logicielle et Ahmed et al. [246] décomposent la complexité suivant le problème à modéliser - ce qui inclut les objectifs du modèle, le niveau de détail, les entrées et les résultats attendus -, la technologie et les modélisateurs/utilisateurs de l'outil, dont le détail est visible sur la figure B.1 en annexes.

Parmi les éléments associés à la complexité des modèles de simulation, le niveau de détail et la fidélité des modèles sont des caractéristiques importantes directement corrélées à la capacité d'automatisation de l'activité. Gericke et al. [248] rappellent l'importance de valider les méthodes et outils utilisés en ingénierie, c'est-à-dire de s'assurer de la fidélité des modèles par rapport aux phénomènes à représenter. La vérification et la validation sont deux notions importantes dans un souci de contrôle de la qualité, que ce soit durant le développement ou lors d'essais de systèmes physiques [68]. L'exemple le plus commun est la validation des modèles numériques utilisés en simulation : le modèle doit être une représentation suffisamment fidèle de la réalité pour l'étude du phénomène ou comportement souhaité, et la validation consiste à identifier le niveau de fidélité du modèle au regard des objectifs [249], [250]. Lorsqu'il est attendu du modèle qu'il soit fidèle, cela sous-entend que le modèle présente deux caractéristiques, illustrées sur la figure 2.12 : le modèle doit être précis, donc la variance autour du résultat souhaité ne doit être pas trop importante, et le modèle ne doit pas présenter de biais, c'est-à-dire qu'il ne doit pas exister d'erreurs systématiques dans la description du modèle, ce qui entraînerait un écart entre le résultat et la valeur cible.

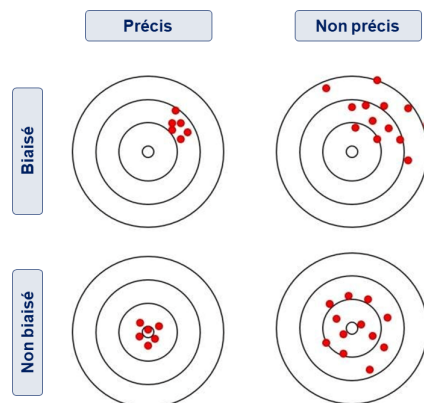


FIGURE 2.12 – Précision et biais d'un modèle

### 2.3. MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

Pour valider la qualité descriptive d'un modèle, plusieurs métriques sont généralement employées dans la littérature. Tous ces indicateurs sont basés sur l'écart entre les résultats « réels », obtenus par simulation ou expérimentation, et les résultats du modèle à valider. Le premier indicateur utilisé est généralement le coefficient de détermination  $R^2$  mesure à quel point le modèle est capable de capturer la variabilité par rapport au résultat réel. Il s'exprime comme :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

avec  $n$  le nombre de point de mesure et  $\bar{y}$ ,  $\hat{y}_i$  et  $y_i$  représentent la moyenne des mesures, la prédiction et le résultat réel du modèle. Plus la valeur du  $R^2$  est proche de 1 et plus le modèle retourne les valeurs attendues, avec cependant deux cas de vigilance. Le premier est dans le cas d'un sur-apprentissage (*overfitting*) qui donnerait de bonnes valeurs sur les points étudiés, mais serait très mauvais pour la prédiction avec des paramètres jamais utilisés précédemment, et le deuxième cas apparaît lorsque la réponse en sortie est relativement insensible aux paramètres d'entrée ce qui conduit le modèle à avoir des prédictions proches de la valeur moyenne des valeurs réelles, ce qui va induire un  $R^2$  de 0 alors que le résultat est bien prédit. Pour pallier ces problèmes, cet indicateur est généralement couplé à un autre des indicateurs ci-dessous pour s'assurer de la qualité des prédictions [251]. L'erreur absolue maximale (*Maximum Absolute Error (MAE)*) est définie comme :

$$MAE = \max |y_i - \hat{y}_i| \quad i = 1, \dots, n$$

L'erreur absolue moyenne (*Average Absolute Error (AAE)*) est définie comme :

$$AAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n}$$

L'erreur absolue moyenne en pourcentage (*Mean Absolute Percentage Error (MAPE)*) est définie comme :

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}}{n} * 100\%$$

L'erreur quadratique moyenne (*Mean Squared Error (MSE)*) est définie comme :

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}$$

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Squared Error (RMSE)*) est définie comme :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

Plus ces mesures d'erreur sont faibles et plus le modèle est précis. La MAE donne une mesure de la précision locale du modèle tandis que l'AAE, le MAPE, le MSE et le RMSE donnent une mesure de la précision globale. Enfin, la RMSE est la mesure la plus couramment utilisée, surtout dans l'étude de modèles de régression comme les arbres aléatoires ou les réseaux de neurones, mais elle peut être biaisée car les écarts ne sont pas mesurés de façon relative et est sensible aux écarts extrêmes, contrairement à la métrique MAPE.

## 2.3. MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

Finalement, différents KPI ont été étudiés pour évaluer la performance des outils métier utilisés dans le PDP. Dans un premier temps, l'étude s'est portée sur les indicateurs des outils automatisés, pour intégrer une caractéristique importante des outils KBE au système de mesure. Sur ce point, les travaux de Van der Velden [22] sont intéressants à réutiliser, en particulier sur le calcul du ROI du développement d'une solution automatisée. De même, les KPI du nombre de solutions étudiées en parallèle ou encore de taux de retraitement sont pertinents, mais ils ne seront pas intégrés dans notre système de mesure car très dépendant des stratégies de conception utilisées. En revanche, les indicateurs de fidélité des outils automatisés sont à réutiliser pour les modèles d'ingénierie, bien qu'ils ne seront pas appliqués dans ces travaux en raison des hypothèses considérées (bonne qualité des produits et des modèles utilisés). Finalement, nous avons identifié un KPI à adapter, pour aider les concepteurs à comparer la complexité du développement et de l'utilisation d'un outil KBE par rapport aux autres outils existants. Ces résultats sont soulignés dans la figure 2.13.

### **KPI à réutiliser :**

- Fidélité des modèles ( $R^2$ , MAE, MSE, RMSE, etc...). \*
- Calcul du ROI de Van der Velden.
- Coûts et temps d'investissement.

### **KPI à adapter :**

- Complexité (calculatoire, structurelle, des modèles, etc...).

\* : ces indicateurs ne seront pas appliqués dans le chapitre 4 sur la validation du système de mesure proposé.

FIGURE 2.13 – Synthèse des KPI pour les outils métier

### 2.3.3 Indicateurs de performance du processus de capitalisation des connaissances

Kügler et al. [89], dans l'état de l'art sur l'évolution des solutions KBE, rappellent le rôle central de la « réutilisation des modèles de connaissance, des bases de connaissances ou même des applications KBE » en tant qu'objectif d'implémentation de ces approches. Les solutions pour parvenir à une meilleure gestion ne sont pas encore clairement identifiées, par exemple Saintier et al. [91] militent pour une gestion centralisée et monolithique de la BDC en justifiant cette approche par une maintenance simplifiée. Ce type d'approche peut être d'autant plus justifié que les échanges de données et d'informations entre différentes plateformes ou outils est compliqué par les différentes normes d'échanges de données [90]. Les problèmes rencontrés lors du PDP sont les fruits de l'absence de la capitalisation de données centrales, de « haut niveau telles que le raisonnement sur les contraintes du projet, les stratégies de génération de solutions, l'intention de conception et la connaissance de la chaîne d'approvisionnement » [145, 90].

Sur les travaux analysés par [89], aucun n'indique de modèle ou BDC qui puisse être consulté et/ou réutilisé sur une autre application. Plus de la moitié (54 %) n'indiquent pas l'origine des connaissances

### 2.3. MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

contenues dans la base, ni comment interroger cette base pour extraire les connaissances à traiter. De plus, les informations issues d'experts manquent de détail sur l'objectif de ces informations ou le moyen de formalisation. Les auteurs soulignent qu'aucune publication étudiée ne questionne l'origine des sources de connaissances, faisant référence « au PLM, à la CAO ou aux documents de développement » sans plus de description sur la structure des modèles et les informations extraites. Le résultat de cette analyse bibliographique donne l'impression que la gestion, la capitalisation, l'extraction et la réutilisation des connaissances est une composante externe aux systèmes KBE qui serait maîtrisée et prête à être déployée avec le système KBE. Plusieurs études bibliographiques ont été réalisées sur la mesure de la performance de la gestion des connaissances, notamment par Wong et al. [252], Gao et al. [253] et Shannak [19].

Dans la première étude, ils identifient six catégories pour classer le type de mesures et d'approches utilisées : traditionnelle, avancée, déterministe, stochastique, orientée vers les résultats généraux, orientée vers les résultats spécifiques. Une cartographie des principaux indicateurs pour mesurer la performance des ressources (de connaissances), des processus de gestion de la connaissance et des facteurs de la gestion des connaissances est également proposée. Plusieurs de ces indicateurs sont intégrés au tableau 2.6 ci-dessous, comme le nombre de connexions [21] aux BDC, le nombre de documents ou éléments ajouté à ces bases [254] ou encore le nombre de requêtes réalisées [255].

L'étude de Gao et al [253] passe en revue la gestion des connaissances dans la conception théorique et les approches de conception autour de trois axes : représentation de la connaissance et organisation, partage de la connaissance et enfin mesure de la performance de la gestion des connaissances. La mesure de la performance de la gestion des connaissances inclut la définition d'indicateurs de performance ainsi que la définition d'une méthode d'évaluation [256]. Comme il avait été vu avec Barth et al. [79], il existe deux types d'approches, qualitative et quantitative, et les indicateurs quantitatifs peuvent se sous-catégoriser en « financier » et « non-financier » d'après [257]. Les auteurs identifient les principaux systèmes de mesure de performance de la gestion des connaissances [258], [252], [259], [256], [260], [261], qui reposent principalement sur la décomposition matricielle de l'organisation, des silos de connaissances, des gains économiques et financiers observés, sur la définition - informatique - des BDC ainsi que sur les interactions entre les utilisateurs et ces bases. Ces matrices sont généralement complétées par les utilisateurs sur des échelles de niveaux (exemple : très mauvais/mauvais/moyen/bon/très bon) pour identifier les tendances des performances de la gestion des connaissances. Un exemple du système de Wang et al. [258], découpé entre le processus de gestion des connaissances, la structure organisationnelle de la connaissance, les gains économiques et l'efficacité est présenté sur la figure B.2 en annexe.

Enfin, les travaux de Shannak [19] organisent la mesure de la performance de la gestion des connaissances autour de trois axes : le processus, l'humain et les infrastructures informatiques - voir figure B.3 en annexe. Les indicateurs sont mesurés par l'intermédiaire de questionnaires, des reports des responsables ou bien par les connexions aux BDC. L'approche du « tableau de bord équilibré » (*balanced scorecard*) est proposée pour gérer facilement les données quantitatives obtenues par les connexions aux BDC, les résultats qualitatifs des questionnaires étant traités à part - il n'existe pas pour l'auteur d'outil ou méthode capable de manipuler simultanément les données quantitatives et qualitatives. On retrouve dans cette matrice les principaux indicateurs déjà observés par les précédentes analyses,

### 2.3. MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

comme le nombre de connexions aux différentes bases, le nombre de données ou informations réutilisées depuis une base ou encore le nombre de connaissances ajoutées dans ces bases. L'intérêt de cette matrice est de clairement identifier les indicateurs nécessitant un questionnaire pour pouvoir être relevé, de ceux qui peuvent être déduits automatiquement par la mesure des traces dans une BDC. C'est tout l'intérêt d'être capable d'identifier les éléments de contexte de réalisation d'une tâche durant les processus (à travers les QQQCOP), car cela permet d'extraire de ces informations un certain nombre d'indicateurs basés notamment sur les temps passés et le nombre d'actions réalisées. Les indicateurs d'engagement (« IT - Active involvement » de la figure B.3) sont comptabilisés par utilisateur ce qui est problématique pour comparer dans le temps l'évolution de l'indicateur. Il semble plus pertinent d'intégrer la notion de fréquence, comme dans les indicateurs proposés par [255], [254] ou [21], en comptant le nombre d'actions par utilisateur et sur une période donnée. L'utilisation d'un questionnaire est également un outil efficace pour déterminer le gain qu'apporte la BDC dans l'aide à la conception, comme le démontre Wheeler [262]. Deux expérimentations ont été réalisées : une pour vérifier si les connaissances capitalisées aident les développeurs à implémenter une application KBE et une pour vérifier si les participants comprennent comment la connaissance est implémentée dans le code. Les résultats, des questionnaires remplis par les deux groupes, démontrent que l'utilisation de la BDC permet une amélioration de la performance dans les deux cas, respectivement 2.8 et 1.9 fois plus performants par rapport aux taux de réponse du questionnaire.

TABLE 2.6 – Indicateurs pour la capitalisation et la gestion des connaissances

Mesure	Description de la métrique	Références
Compétences et connaissances (concepteur)	Résolution de problèmes, prises de décision, connaissances techniques, créativité technique, responsabilité.	[263]
Compétences et connaissances (équipe)	Niveau de compétence des membres de l'équipe (nombre de personnes un très bon/moins bon niveau de compétences), nombre de ressources (non-humaines) inutilisées, nombre de concepts étudiés en équipe comparé au nombre de concepts étudié habituellement.	[263]
Capitalisation des connaissances	Nombre de conceptions enregistrées comparées au nombre de conceptions créées.	[264], [19]
Utilisation de standards	Nombre de composants standards comparé au nombre de composants totaux.	[221]
Niveau de standardisation	Pourcentage de composants d'un produit fini utilisés dans au moins un autre produit fini précédent.	[20]
Accès aux connaissances	Disponibilité et qualité des connaissances à disposition pour réaliser une activité.	[265], [19]
Réutilisation des connaissances	Nombre d'utilisation de l'information.	[21], [255], [19]

Suite en page suivante

## 2.3. MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

Table 2.6 – Suite

Mesure	Description de la métrique	Références
Réutilisation des connaissances	Les employés utilisent les BDC avant la réalisation d'une tâche. Les employés effectuent des recherches approfondies dans les BDC relatives aux clients et aux tâches afin d'obtenir les connaissances nécessaires à l'accomplissement de ces dernières. Les employés utilisent internet pour obtenir les connaissances nécessaires à l'accomplissement de leurs tâches. Les salariés obtiennent des informations et des suggestions utiles lors de réunions de réflexion. Les salariés recherchent des informations sur les tâches à accomplir dans diverses sources de connaissances gérées par l'organisation.	[266]
Accès aux bases de connaissances	Nombre d'accès aux BDC par utilisateur sur une période donnée. Nombre de documents ou articles consultés ou téléchargés par employé sur une période de temps donnée.	[255], [254], [21]
Maintenance des bases de connaissances	Nombre d'employés sur les BDC. Nombre de documents ou articles ajoutés ou modifiés dans la BDC par utilisateur sur une période de temps donnée.	[254]
Création de connaissances	Temps passé par employé à alimenter la BDC sur une période donnée. Nombre de connaissances (ou objets de connaissances) ajoutées dans la BDC sur une période donnée.	[254]
Internalisation des connaissances	Les employés peuvent accéder aux méthodes ( <i>best practices</i> ) et les appliquer dans leurs tâches.	[266]
Utilisation de la connaissance	Utilisation de nouvelles connaissances et capacité à se l'approprier et à la transformer.	[260]
Interface Homme-Machine	Ergonomie du moteur de recherche de la BDC.	[19]
Culture d'entreprise	Niveau de partage des connaissances des employés entre eux. Niveau d'entraide entre les employés dans la réalisation de leurs tâches.	[19], [267]
Gain de temps	Dans quelle mesure les employés gagnent du temps en trouvant l'information ou la compétence adaptée dans la BDC.	[19]

Les KPI de la gestion des connaissances dans la littérature scientifique sont très variés. Une proportion importante des indicateurs relevés dans les revues bibliographiques, comme ceux de [252] et [253], sont définis dans un contexte macroscopique, mais manquent de détails quant à leur implémentation dans le processus de mesure final. Par exemple, les indicateurs de « valeur ajoutée par professionnel » ou « les employés obtiennent des informations utiles et des recommandations suite aux réunions » [266] manquent de détails sur leur mise en œuvre dans un processus de conception. La proposition issue de ces travaux s'attachera au maximum à détailler le périmètre et le moyen de mesure des KPI qui seront proposés.

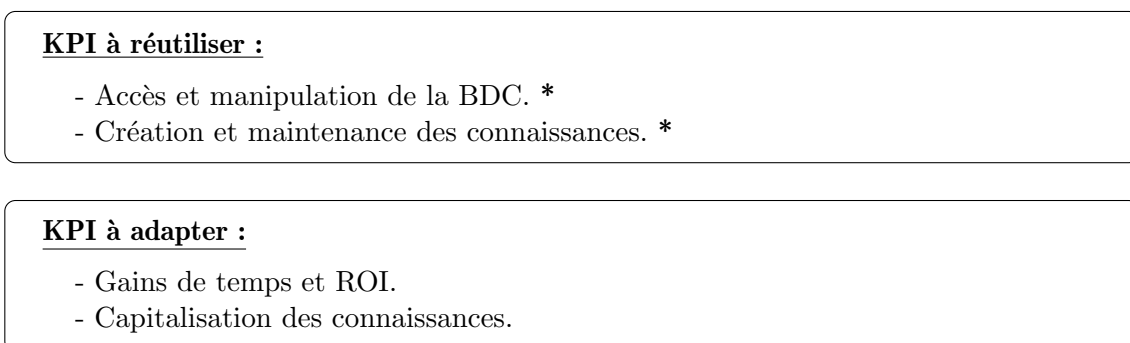
Une autre problématique avec les nombreux indicateurs identifiés dans la littérature est le manque

### 2.3. MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

de lien entre les objectifs d'implémentation de ces indicateurs et leur mesure. Les systèmes métriques proposés intègrent une telle quantité d'indicateurs différents, pour mesurer l'ensemble des composantes (humain, matériel, processus, etc...) de la gestion des connaissances, qu'ils en deviennent impossibles à implémenter en pratique sans devenir invasifs pour les utilisateurs finaux. Comme c'est justement souligné dans [19], l'évaluation de la performance avec l'utilisation des systèmes présents dans la littérature est difficile à cause du nombre d'indicateurs important et également à cause du flou dans la définition d'un certain nombre de ces indicateurs - en plus de dépendre de la subjectivité des personnes lors de l'usage de questionnaires.

Finalement, plusieurs indicateurs ont été identifiés pour mesurer la capitalisation, gestion et réutilisation des connaissances. Les KPI pour mesurer la performance de la gestion des connaissances reposent sur : l'humain, l'infrastructure technique et logicielle, l'organisation ou encore les processus. Il a été vu qu'une partie de ces indicateurs sont relativement mal définis, soit parce que l'objectif de leur mesure n'est pas parfaitement identifié ou bien parce que le moyen de les mesurer, le protocole, n'est pas explicité. Les indicateurs d'accès et d'utilisation à la BDC sont utiles pour évaluer l'adoption de la solution au sein de l'environnement, et sont donc pertinents à réintégrer à travers l'IHM d'une solution KBE. Ils ne seront toutefois pas utilisés dans ces travaux. En revanche, les indicateurs manquent de maturité pour évaluer les gains de temps et le ROI apportés par la capitalisation et réutilisation des connaissances. Il n'existe pas, à notre connaissance, de formule de ROI plus complète que l'estimation de gain de temps. L'objectif serait de construire un indicateur pour estimer le ROI associé au développement et à l'utilisation d'un système de capitalisation des connaissances, qui serait déterminé à partir de différentes durées en jeu dans la capitalisation et la recherche d'informations. De même, par rapport au système de capitalisation, il serait intéressant d'avoir un indicateur de ce qui est capitalisé. Dans notre cas, nous souhaiterions avoir une indication des informations QQQCOP capitalisées pour chaque activité métier, ce qui serait une extension d'un KPI sur le contenu capitalisé. Les résultats de l'analyse de l'état de l'art sur l'évaluation des activités de capitalisation sont rassemblés dans la figure 2.14.



\* : ces indicateurs ne seront pas appliqués dans le chapitre 4 sur la validation du système de mesure proposé.

FIGURE 2.14 – Synthèse des KPI pour les activités de capitalisation

### 2.4 Synthèse de l'état de l'art

La première partie de cet état de l'art a posé les fondations et les principales définitions de la capitalisation et de la gestion des connaissances. Cette section a également introduit le cycle de la construction des connaissances ainsi que la définition des MM de capitalisation. Une analyse de différents MM « produit-processus » et « processus » avait déjà été réalisé par Es Soufi [15] ce qui a amené à la construction d'un MM processus adapté à la capitalisation du contexte QQQCOP. La principale conclusion de cette section 2.1.4 de l'état de l'art est que les MM identifiés sont adaptés à certains besoins, qui ne collent pas parfaitement avec les besoins de l'entreprise Nexteam Group. En effet, les MM proposés ne peuvent pas capturer des éléments en entrée ou sortie des activités qui deviendraient des ressources, ou inversement. Notre proposition de MM de capitalisation ira donc dans ce sens afin d'élargir le spectre des activités capitalisables, tout en offrant une meilleure capture des justifications des activités de conception.

La deuxième partie de l'état de l'art a commencé par la définition et l'introduction des principaux systèmes KBE issus de la littérature scientifique. Plusieurs limites à l'implémentation des systèmes KBE ont été identifiées, dont la difficulté d'identifier les cas d'utilisation où il est pertinent de déployer de tels systèmes, et l'absence de méthodes et d'indicateurs (quantitatifs) permettant de valider le succès de l'utilisation de ces approches. L'analyse de plusieurs cas d'études de la littérature révèle qu'une majorité des implémentations annoncent des gains en coût et/ou en temps sans les quantifier, et dans les plus rares cas où des chiffres sont proposés, les méthodes de mesure ne sont pas explicitement décrites. Les analyses les plus complètes utilisent la mesure des différents temps d'activités pour permettre la déduction d'un ROI de l'outil, mais en négligeant la mesure de la performance associée à la capitalisation des connaissances. Comme les études sur la performance des systèmes KBE ne proposent pas de systèmes de mesure associés, la suite de l'état de l'art s'est orientée vers la mesure de la performance des PDP, ce qui inclut l'évaluation de l'impact des outils utilisés pour réaliser les activités de conception.

La troisième et dernière partie de l'état de l'art s'est concentrée sur l'analyse des indicateurs pour mesurer la performance de trois axes principaux : les activités métier, les outils métier, et enfin le processus de capitalisation des connaissances. Ces deux derniers axes représentent des caractéristiques générales des systèmes KBE, afin de construire la continuité dans le cycle des connaissances entre les activités métier et les ressources utilisées pour les réaliser (les outils métier qui sont intégrés dans un système KBE). Les systèmes de mesure présentés dans la littérature proposent une analyse au niveau des activités de conception (local) et au niveau du PDP (global), sans toutefois bien définir les protocoles de mesure à utiliser. La mesure de la performance de l'automatisation d'activités est une dimension importante car c'est une composante centrale des systèmes (KBE, de capitalisation et de gestion des connaissances, d'inférence, etc...), comme ça a pu être présenté dans la méthode DEE ou dans la revue des cas d'études. Enfin, les indicateurs de la capitalisation et la gestion des connaissances sont systématiquement négligés dans un contexte de mesure de la performance de méthode KBE, et l'identification des indicateurs clés sur cette thématique va aider à structurer et proposer un système de mesure de la performance adapté au PDP incluant des méthodes KBE. Nous avons identifié (dans les figures de synthèse 2.11, 2.13 et 2.14) les KPI utiles à conserver et/ou à adapter dans notre système de mesure pour les trois composantes du PDP. La figure 2.15 propose une synthèse des KPI qui sont

## 2.4. SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DE L'ART

à conserver ou à adapter dans notre proposition.

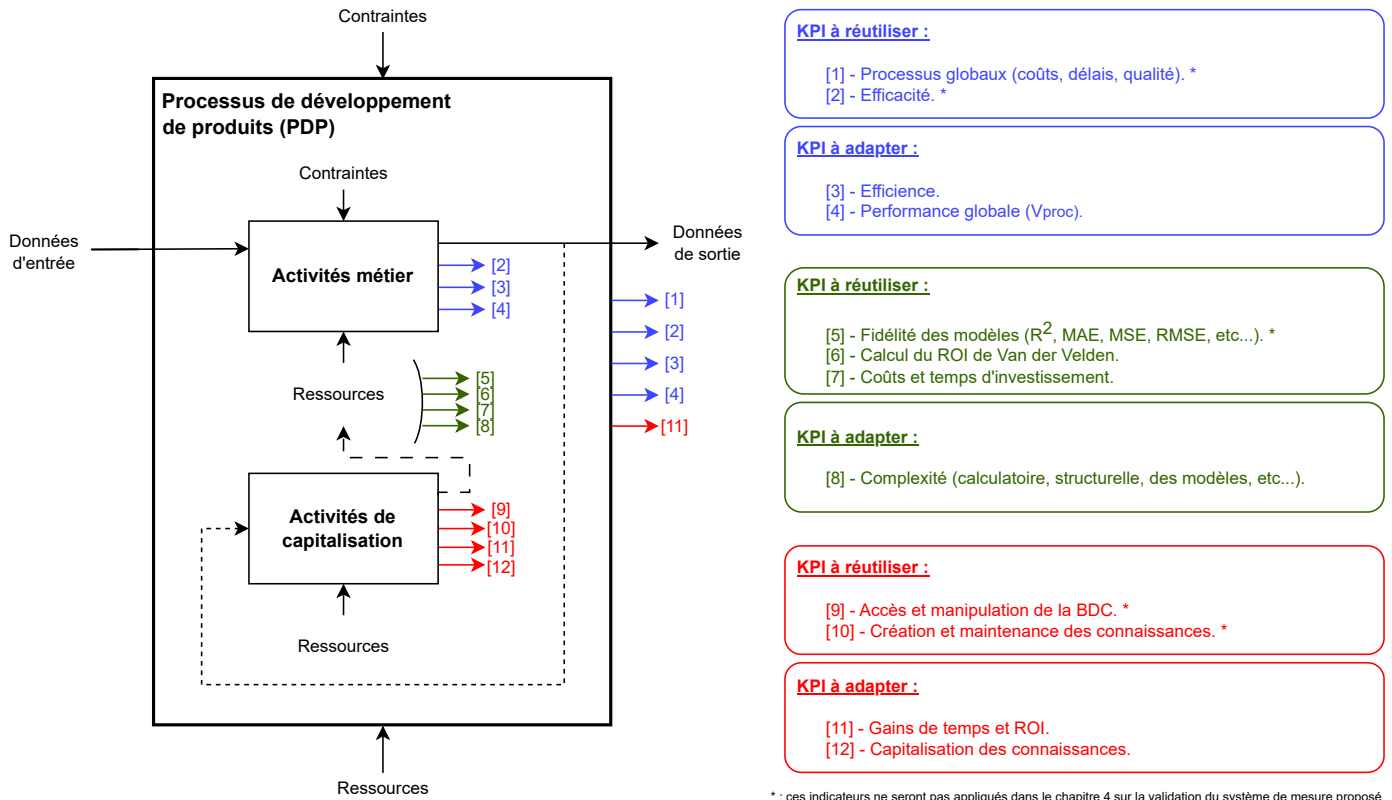


FIGURE 2.15 – Synthèse des indicateurs à conserver et à adapter dans la proposition de système de mesure

Comme cela a été présenté dans la section 2.3, la définition d'un indicateur se fait au regard des objectifs ciblés et avec une méthode de mesure clairement établie [215]. Ainsi, le système de mesure doit permettre la mesure de la variation de performance entre le PDP initial (*as-is*) et le PDP qui intègre les outils KBE (*to-be*). Pour rappel, les objectifs recherchés par l'utilisation d'outils KBE sont :

- Obtenir un gain en temps et en coûts par l'utilisation systématique de ces outils ;
- Automatiser les tâches répétitives et à faible valeur ajoutée pour offrir plus de temps aux concepteurs sur les tâches à forte valeur ajoutée ;
- Capitaliser les connaissances métiers de l'entreprise dans un outil d'aide à la conception ;
- Réutiliser les connaissances métiers dans les futures activités de conception.

Ces objectifs sont génériques aux méthodes KBE [89], mais aucun système de mesure n'a été proposé à l'échelle du PDP pour mesurer leur impact d'après l'analyse de l'état de l'art. Cela empêche, d'une part, de mesurer l'impact de l'utilisation de ces outils sur la performance du processus et, d'autre part, d'identifier les situations où l'utilisation de ces outils est pertinente. La mesure du gain en temps et, dans quelques rares cas, la quantification d'un ROI sont les principaux indicateurs utilisés pour évaluer la performance des outils KBE. Sur les quatre objectifs identifiés, le premier est

## 2.4. SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DE L'ART

traité partiellement, car nous n'avons pas identifié d'étude qui aide à définir si le développement d'une solution KBE va apporter des gains de temps et de coûts, et les trois autres points ne sont pas traités. En revanche, lorsque ces objectifs sont étudiés séparément il existe des KPI dans la littérature, dont certains que nous allons conserver et d'autres qui restent à adapter dans notre proposition de système de mesure.

Dans ce contexte, il apparaît utile de définir un système de mesure de la performance lié à l'implémentation et à l'utilisation d'outils KBE. Dans le prochain chapitre, notre proposition détaille dans la section 3.1 la structure d'une approche KBE intégrée dans le PDP, puis dans la section 3.2 le modèle formel des connaissances adapté à la capitalisation et la réutilisation des connaissances dans un contexte de conception de produits. La deuxième partie de notre proposition porte sur l'élaboration d'un système de mesure, présentée en section 3.3, pour quantifier les apports de l'utilisation de systèmes KBE par des indicateurs.

Enfin, pour poursuivre l'effort de structuration des travaux de recherche, le *benchmark* proposé par [7] est actualisé, sur la figure 2.16, avec les éléments apportés par ce deuxième chapitre. Deux composants sont ajoutés à ce modèle : tout d'abord les différents outils KBE existant dans la littérature dans la catégorie des solutions, techniques, au sein de la collection expérimentale notre contexte d'étude. Mais également, pour les protocoles de mesure et de validation des résultats, les différents systèmes de mesure utilisés pour évaluer la performance d'un processus de conception, qu'il intègre ou non des outils KBE.

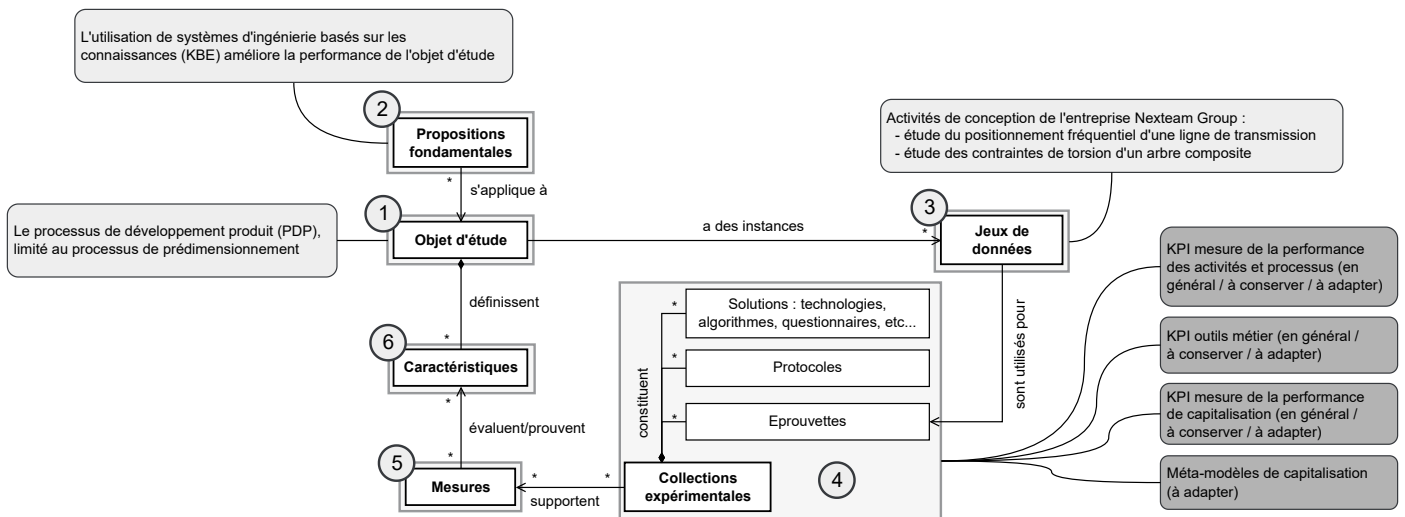


FIGURE 2.16 – Méta-modèle de benchmark à l'issue du chapitre 2

## 2.4. SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DE L'ART

---

## Chapitre 3

# Proposition : méthode d'implémentation de système KBE et mesure de la performance développée associée

### Contenu

---

<b>3.1</b>	<b>Définition du système KBE</b> . . . . .	<b>100</b>
<b>3.2</b>	<b>Méta-modèle de capitalisation des connaissances</b> . . . . .	<b>105</b>
<b>3.3</b>	<b>Définition du système de mesure de la performance développée</b> . . . . .	<b>109</b>
3.3.1	Mesure de la complexité des outils métier . . . . .	110
3.3.2	Mesure de la performance des activités et du processus . . . . .	115
3.3.3	Mesure de la performance de la capitalisation des connaissances . . . . .	120
<b>3.4</b>	<b>Bilan de la proposition</b> . . . . .	<b>125</b>

---

---

Ce chapitre détaille la proposition scientifique de ce travail de thèse pour répondre à la problématique identifiée dans le chapitre 1 et sur la base des conclusions de l'état de l'art constitué au chapitre 2. Pour rappel, l'objectif industriel final est d'être capable d'améliorer la performance du processus de conception. Cela sous-tend de pouvoir mesurer, quantifier, cette performance d'une part, et d'identifier les ressources métier capable d'influencer positivement cette mesure de la performance d'autre part. Dans l'analyse de l'état de l'art du chapitre précédent, les méthodes KBE ont été identifiées comme de bons leviers de performance, mais des limites ont été soulevées dans leur implémentation ainsi que dans l'évaluation des gains qu'elles apportent. Ce chapitre a vocation à présenter la proposition scientifique issue de ces travaux, structurée autour de quatre sections :

- La première section développe la structure générale du système KBE qui s'intègre dans le PDP.
- La deuxième section se concentre sur la ressource du processus de capitalisation, le modèle formel de connaissances : la définition du MM de capitalisation des connaissances.
- La troisième section détaille les différents indicateurs de performance du PDP pour évaluer les impacts de l'implémentation et de l'utilisation d'un système KBE : d'abord les KPI des outils métier, puis les KPI des activités métier et enfin les KPI du processus de capitalisation.
- La quatrième et dernière section tire les conclusions des propositions apportées dans ce chapitre.

La figure 3.1 ci-dessous présente l'organisation de ce chapitre sur le positionnement des différentes propositions autour du PDP. Le système KBE regroupe des composantes des outils métier, du processus de capitalisation et du MM de capitalisation. Ce dernier est une ressource du processus de capitalisation à disposition des utilisateurs. Le flux des connaissances apparaît en flèches grises et traduit la capitalisation du contexte QQQCOP dans les activités de capitalisation. Enfin, les différents indicateurs sont mesurés en sortie des activités métier, des activités de capitalisation et en relation avec les outils métier.

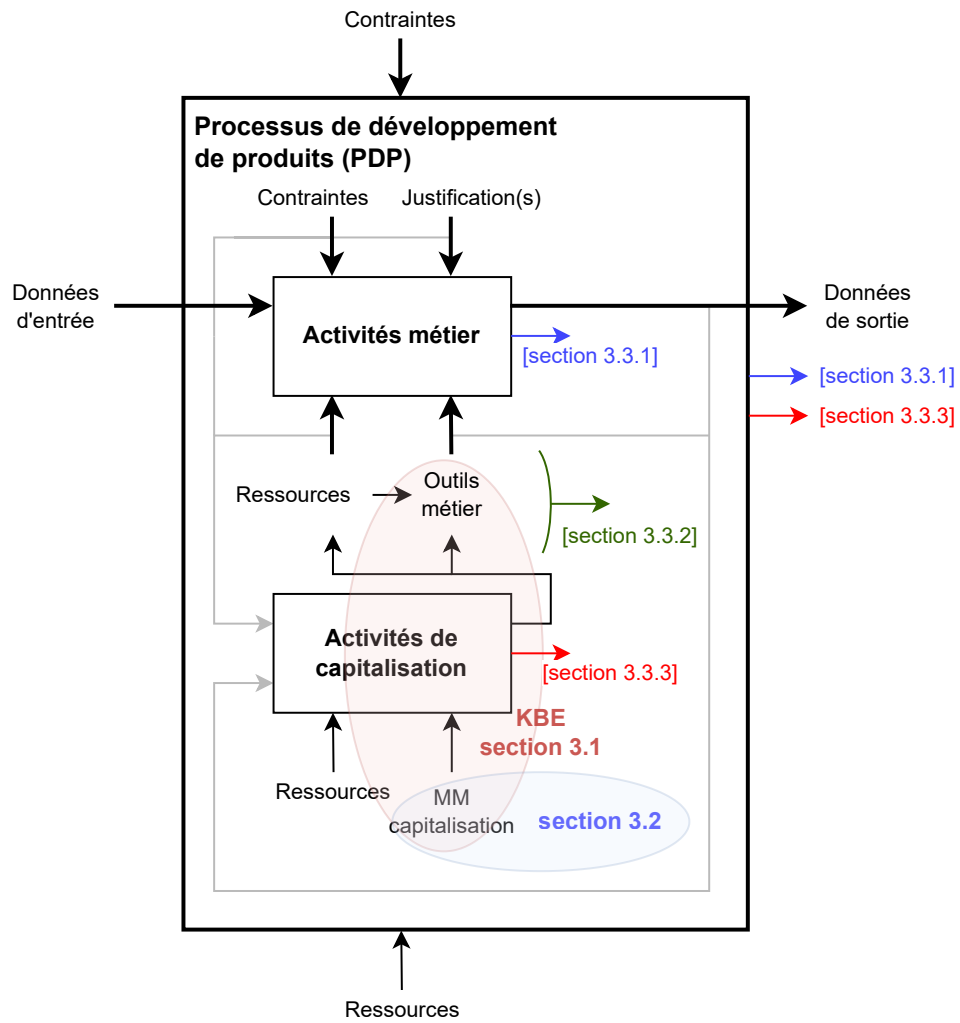


FIGURE 3.1 – Présentation de l'organisation du chapitre 3 basée sur la structure du PDP visée à l'issue de la proposition

### 3.1 Définition du système KBE

L'implémentation d'un système KBE dans un environnement industriel se fait en considérant les objectifs auxquels il doit répondre. Dans la littérature, il a été vu dans le précédent chapitre que ces méthodes sont développées pour « réduire les temps et les coûts de développement ». Le temps gagné peut alors être réutilisé soit pour explorer des concepts alternatifs, pour étendre l'espace des solutions exploré, soit pour innover en explorant des pistes complètement nouvelles, ou encore pour augmenter le nombre de projets menés en parallèle à charge équivalente. Cette première section présente donc la structure d'un système KBE pour répondre à ces objectifs. La figure 3.2 présente le PDP dans la configuration *as-is* à gauche, qui est une reprise de la figure 1.2, et dans la configuration *to-be* à droite.

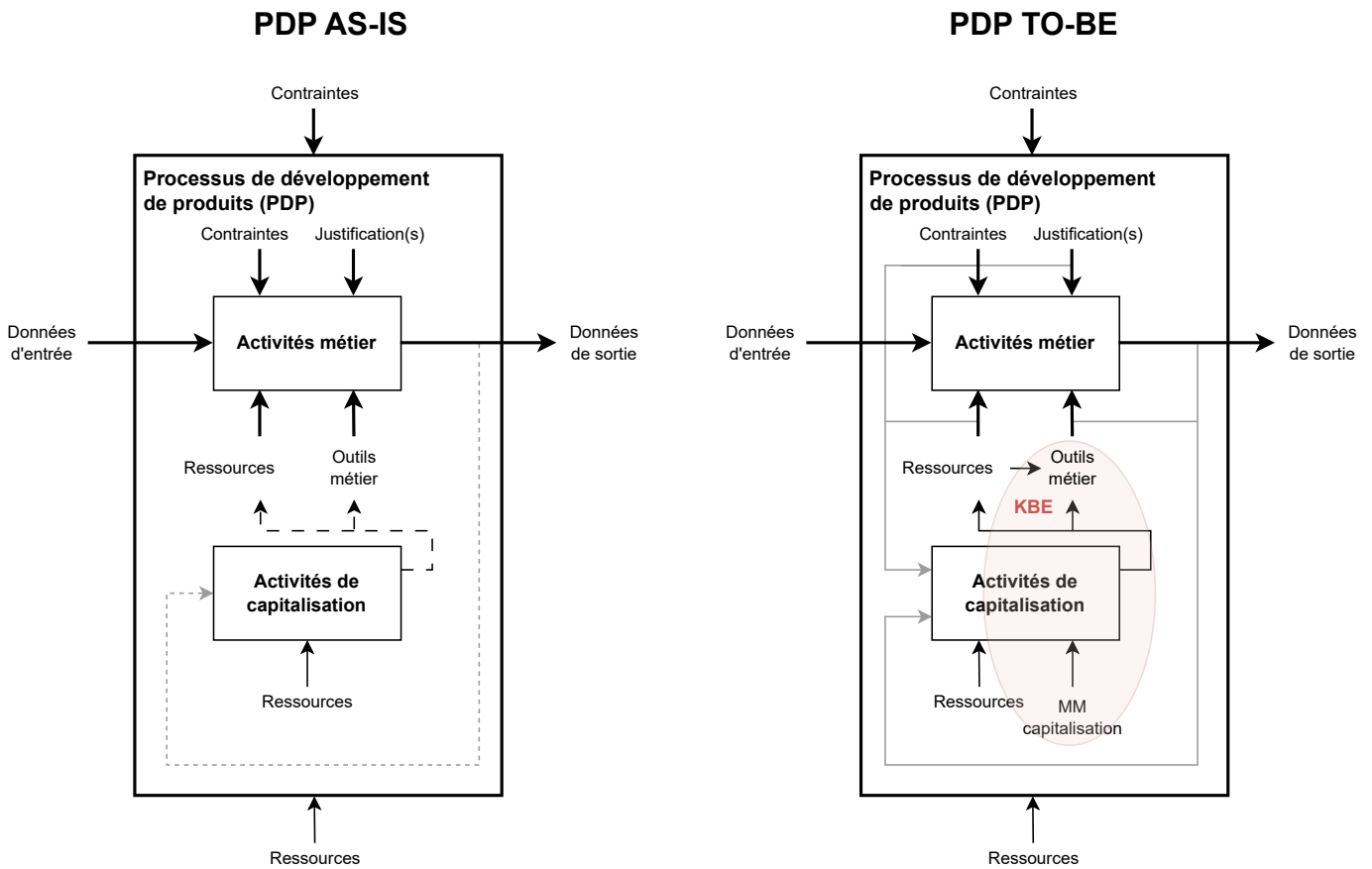


FIGURE 3.2 – Proposition de structure des processus métier et de capitalisation ainsi que le lien entre eux à travers une méthode KBE

Pour rappel de ce qui a été présenté au chapitre 1, la capitalisation des connaissances et la réutilisation des connaissances dans le PDP sont faibles, ce qui est représenté respectivement par de petits et grands traits pointillés sur la figure de gauche (*as-is*). Comme l'intégration de systèmes KBE arrive pour pallier ces problèmes, les traits pointillés deviennent continus sur la figure de droite (*to-be*). Avec l'intégration des moyens de capitalisation, l'ensemble du contexte QQQCOP des activités métier est ca-

### 3.1. DÉFINITION DU SYSTÈME KBE

---

pitalisé dans le processus de capitalisation. Les ressources « outils métier » et « MM de capitalisation » sont mises en avant dans le PDP *to-be* puisqu'elles représentent des composantes du système KBE, qui sont maintenant positionnées dans le cycle global de la capitalisation et réutilisation des connaissances.

Le système KBE est la combinaison des outils métier et de la réutilisation des connaissances (voir les méthodes MOKA, DEE ou KNOMAD). Pour y parvenir, les connaissances capitalisées doivent pouvoir être réexploitées lors de la réalisation des activités métier. La figure 3.2 illustre la continuité des connaissances entre les activités métier et les ressources à disposition des concepteurs pour les réaliser. La continuité du cycle des connaissances est assurée par le MM, qui est détaillé en section 3.2. Il existe également un lien entre les ressources des activités métier, existantes ou créées à partir du processus de capitalisation, et les outils métier. Ces derniers peuvent récupérer une partie des connaissances acquises dans les BDC pour aider les concepteurs, ou bien interagir avec d'autres ressources (logiciels par exemple).

L'objectif est d'identifier le moyen d'implémenter un PDP tel que présenté en figure 3.2. Tout d'abord, l'utilisation des outils métier supporte les concepteurs dans le prédimensionnement d'un produit, avec les meilleurs coûts et délais possibles s'ils réutilisent les connaissances adaptées. Pour cela, l'outil doit guider les concepteurs dans la démarche de prédimensionnement, par exemple à travers l'utilisation de systèmes de recommandation. Cela passe par l'utilisation d'outils métier qui intègrent et réutilisent des connaissances métier, pour orienter les concepteurs dans les choix à réaliser ou les aider à analyser des résultats. Mais également par l'accès à une BDC dans laquelle l'utilisateur peut rechercher les connaissances nécessaires pour l'aider dans son processus. Il s'agit à la fois de créer un système pour aider un concepteur inexpérimenté à développer un produit aussi rapidement qu'un concepteur plus expérimenté, tout en créant un système qui est enrichi par les concepteurs expérimentés, pour accompagner la montée en compétence de l'ensemble des utilisateurs.

Il a été vu, lors de l'analyse de l'état de l'art, que les systèmes KBE étudiés sont soit trop théoriques, comme MOKA ou KNOMAD, soit trop spécifiques à des cas d'utilisation, ce qui empêche de réimplémenter la démarche sur d'autres cas d'application. Pour répondre à ce besoin d'intégrer les KBS au sein d'un PDP, une proposition d'architecture décomposée est proposée sur la figure 3.3. Cette proposition d'implémentation est suffisamment générique pour s'intégrer dans n'importe quel PDP, comme illustré sur la figure 3.3, sans toutefois être trop théorique, ce qui peut aider à son adoption dans des environnements industriels.

Le système KBE proposé s'appuie toujours sur un utilisateur, le concepteur, et demeure purement un outil de support à la conception qui n'a pas vocation à remplacer le concepteur. L'ensemble des solutions et choix techniques reste validé par le concepteur, car l'objectif n'est pas d'automatiser intégralement le processus de prise de décision. Il s'agit plutôt de guider et assister le concepteur dans ses tâches de conception pour limiter le risque d'erreurs, réduire le temps passé par activité ou encore assurer la qualité finale de l'activité réalisée.

### 3.1. DÉFINITION DU SYSTÈME KBE

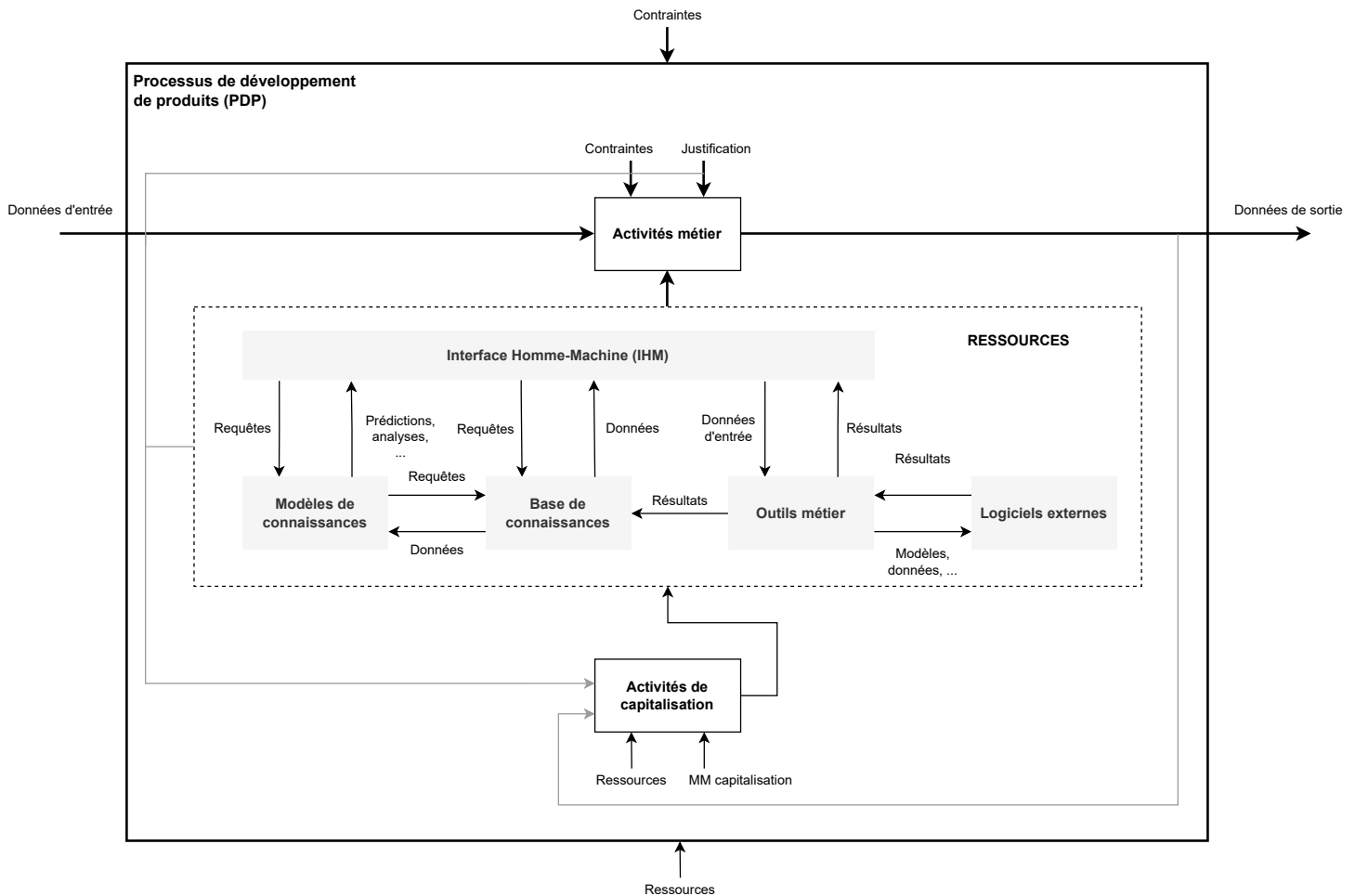


FIGURE 3.3 – Proposition mise à jour avec le détail de la structure du système KBE comme ressource du processus métier

Les différents composants de l'architecture du KBS proposée sont :

- **L'IHM.** Articuler le système KBE autour du concepteur impose la présence d'une IHM. Ce dernier doit pouvoir interagir avec la BDC et les différents outils métier pour réaliser les activités de conception. C'est le premier composant présenté sur l'architecture et il centralise dans une seule et même application l'ensemble des outils nécessaires à l'utilisateur, avec des capacités évolutives de l'application pour y intégrer de nouveaux outils à mesure que les besoins apparaissent et évoluent. Ce composant est purement logiciel, et il se doit d'être le plus ergonomique possible pour faciliter l'adoption de l'outil par les concepteurs. En effet, plus un KBS est utilisé, et plus il aide à capturer et capitaliser les connaissances des activités réalisées à travers l'outil. L'IHM permet à l'utilisateur d'interagir avec les composants présentés en figure 3.3, que ce soient les outils métier, la BDC ou bien les modèles de connaissance. L'utilisateur a également accès aux logiciels externes, qui sont d'autres ressources du processus métier, mais sans l'obligation de passer par l'IHM.

- **La BDC** Les compétences nécessaires au développement d'un produit sont variées, allant de la connaissance du PDP aux connaissances des outils à utiliser, des données des procédés de fabrication ou encore des moyens de contrôle, d'essais et de fabrication disponibles. Tout cet éventail de connaissances, qui prend des formes hétérogènes, doit être capitalisé dans la BDC puis être consulté ou réutilisé au besoin. La traçabilité des informations est au cœur de la capitalisation des processus, et donc du système KBE proposé. Il est plus facile de tracer les informations QQQCOP lorsqu'elles sont mesurables directement depuis l'application plutôt qu'à l'extérieur : mesurer le temps passé sur chaque activité réalisée en dehors d'un logiciel unique est difficile. Cela induirait d'avoir un système de publication (*reporting*) et/ou de traçage pour mesurer les activités en temps réel, ce qui ne semble pas réaliste pour apporter de la performance. Il convient donc d'identifier dans quelle mesure un maximum d'activités clés du processus peuvent être intégrées dans une solution commune, en particulier à long terme, pour obtenir une capitalisation la plus exhaustive possible. C'est le rôle du deuxième composant de l'application, la BDC, proposée dans l'architecture de la figure 3.3. La connaissance peut se structurer à travers différents modèles formels comme les ontologies, les graphes de connaissances ou encore les BDD (Base de données) relationnelles. Ce dernier format est favorisé dans notre proposition pour des contraintes d'intégrabilité dans des environnements industriels [268, 269]. En plus de la facilité à identifier des ressources humaines qualifiées pour développer et maintenir ce type de solution en entreprise, par rapport aux ontologies, l'aspect stockage de données est aussi important que la définition des concepts des connaissances. Il semble que la caractéristique « relationnelle » de la BDD rend possible et suffisante la création de concepts génériques extensibles, par exemple à travers des définitions POO. C'est cette caractéristique relationnelle qui confère à la BDD une dimension de BDC, puisque les informations du contexte viennent enrichir la donnée brute stockée dans la base.
- **Les outils métier.** De nombreux outils métier sont déjà utilisés par les concepteurs pour réaliser tous types d'activités, comme le dimensionnement, la gestion de projet, la planification, la conception, la fabrication ou encore le contrôle. L'ensemble de ces outils métier représente le troisième composant de l'application, et une ressource centrale du processus métier. Une problématique d'interopérabilité apparaît lorsque ces outils existent sous une multitude de formats différents. Deux solutions sont alors possibles : réimplémenter l'outil dans le format du logiciel KBE si c'est faisable, sinon développer des intergiciels (logiciels tiers qui créent un réseau d'échange d'informations entre différentes applications informatique). Ainsi l'application KBE est capable de communiquer avec les outils métier qui fonctionnent via des logiciels tiers. Ces derniers sont représentés par le quatrième composant de l'architecture. Le choix de (re)développer des outils métier ou de développer des intergiciels dépendent du type de projet et de son envergure. La deuxième option présente un risque de complexifier l'implémentation de l'application KBE en multipliant le nombre de systèmes intermédiaires, ce qui entraînerait une explosion des coûts et des politiques de maintenance onéreuses. Cependant, le coût de (re)développement d'outils métier dans un seul logiciel central présente aussi un coût élevé, donc les stratégies sont à sélectionner en fonction des cas d'études.
- **Les logiciels externes.** Les logiciels externes, souvent commerciaux, sont des outils incontournables du PDP et avec lesquels le système KBE interagit pour maintenir une continuité nu-

mérique dans le processus. Il n'est pas possible de créer ou de maintenir cette connexion en permanence, mais capturer les principales informations de l'utilisation du logiciel à travers les QQQCOP aide à capitaliser les traces importantes du processus. Ces logiciels sont essentiels aux concepteurs et sont utilisés de façon récurrente durant le PDP (logiciels EF, CAO, gestion de projet, etc...). De plus, ces outils profitent d'un niveau de confiance élevé car ils répondent à des normes de qualité pour pouvoir être commercialisés. Ce n'est pas le cas pour les outils métier qui sont développés en interne, et qui ne sont pas exempts de bugs ou d'erreurs difficiles à déceler.

- **Les modèles de connaissances.** Enfin, les modèles de connaissance sont le cinquième et dernier composant de l'architecture proposée sur la figure 3.3. Ces modèles sont basés sur des données extraites de la BDC, ou sur des règles métier formalisées par des concepteurs, pour construire de nouveaux éléments de connaissances qui seront utilisés comme nouveaux outils. Les outils *data-driven* ont vocation à s'adapter aux données qui viennent enrichir la BDC pour fournir des résultats rapides sur la base de l'existant. Cela présente une facette supplémentaire de la réutilisation des connaissances, en plus des requêtes à la BDC ou des outils métier qui réutilisent des méthodes de façon structurées. Cette catégorie regroupe par exemple les analyses de sensibilité ou la réduction de modèles des approches *data-driven*, tandis que les règles métier aident à orienter la conception par l'analyse des résultats obtenus sur des activités.

Dans le cas de l'entreprise Nexteam Group et du PDP traité dans la thèse, les outils métier sont développés pour réaliser le calcul de fréquences propres d'une ligne de transmission et pour le calcul des contraintes de torsion d'un arbre de transmission composite. Ces deux outils métier sont reliés à une BDD relationnelle, qui fait office de BDC, et qui structure les données du contexte QQQCOP de la réalisation de chaque activité métier. Les logiciels externes sont les logiciels de modélisation et de calcul par EF que l'entreprise utilise et avec lesquels les outils métier interagissent. Enfin, les modèles de connaissances sont dans la continuité des outils métier et aident au traitement et à l'analyse des résultats obtenus. C'est-à-dire qu'ils vont constituer, à mesure que les données et les connaissances s'accumulent, de nouveaux outils métier pour la réalisation de tâches spécifiques.

Nous venons de présenter le processus de capitalisation et de réutilisation des connaissances dans le PDP. Ce processus correspond au premier niveau de définition d'un outil basé sur les connaissances, basé sur l'analyse du cas d'usage d'après l'analyse de la section 2.2.1, avant de définir le modèle formel de connaissances et définir des outils de mise en œuvre. La prochaine section va présenter en détail le modèle formel de connaissances pour répondre à notre cas d'usage. Il s'agit d'un MM de capitalisation des connaissances, qui amène à la construction de la BDC présentée sur les figures 3.3.

### 3.2 Méta-modèle de capitalisation des connaissances

Cette section présente la structure du MM de capitalisation proposée pour formaliser les connaissances et les structurer dans une BDC métier. Le MM revêt plusieurs fonctions pour répondre aux objectifs explicités sur la figure 2.5 qui sont, pour rappel, la réutilisation des connaissances, la recherche d'informations et l'aide à la décision. Le MM, proposé en figure 3.4, permet en théorie de répondre à toutes ces intentions, mais ces travaux se concentrent sur la résolution des deux premiers objectifs. L'état de l'art a également aidé à identifier que la capture du contexte QQQCOP constitue une base solide pour répondre aux objectifs énoncés. Nous proposons donc le MM de processus, détaillé sur la figure 3.4, sur la base d'une construction autour de la formalisation du contexte de résolution des activités.

Il s'agit d'une représentation de classes UML, dont la démarche est détaillée dans [119], et dont la structure est orientée pour organiser le contexte des activités d'un processus. Les liens entre ces différentes classes sont définis par des relations, qui caractérisent la connexion entre deux classes. Le MM s'articule autour d'« activités », modélisées par des classes **Activity**, qui constituent le processus lorsqu'elles sont considérées dans leur ensemble. Une activité correspond à une tâche réalisée par un acteur, à laquelle sont rattachées les différentes données d'entrée, contraintes, ressources et données de sortie identifiées. Enfin, chaque classe possède un certain nombre d'attributs, et ces derniers constituent les caractéristiques du concept modélisé par la classe.

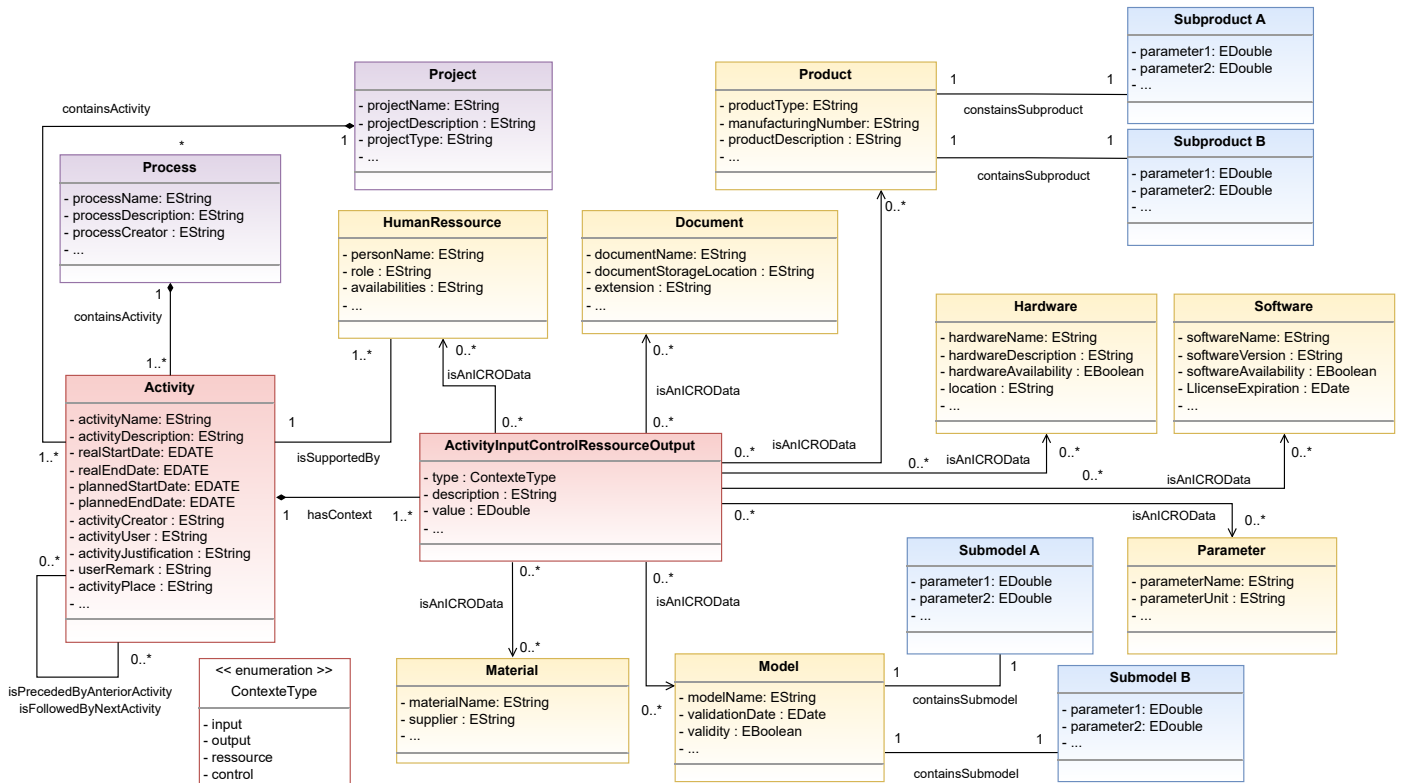


FIGURE 3.4 – Proposition de méta-modèle de processus

### 3.2. MÉTA-MODÈLE DE CAPITALISATION DES CONNAISSANCES

---

L'ensemble des caractéristiques du contexte QQQCOP est capturé dans ce MM. Le « qui ? » est capturé dans la classe **Activity**, à travers des attribut de créateurs et utilisateurs de l'activité, qui peuvent être différents. Le « quand ? » est également capturé dans la classe **Activity** avec les attributs des dates de début et de fin d'activité, à la fois prévisionnelles et réelles. Puis le « quoi ? » représente tout l'intitulé de l'activité et sa description, donc ils sont intégrés à la classe **Activity**, et la classe **ActivityInputControlRessourceOutput** relève toutes les informations sur les données d'entrée et de sorties comme les paramètres, les modèles, etc... Le « comment ? » fait référence aux ressources utilisées lors de la réalisation de l'activité et est enregistré dans la classe **ActivityInputControlRessourceOutput**. Le « où ? » est une mesure du lieu de réalisation de l'activité, qui s'intègre donc dans la classe **Activity**. Enfin, le « pourquoi ? » est formalisé dans la classe **Activity** à travers les justifications de réalisation de ces activités et les différentes remarques que les utilisateurs peuvent formuler. Quatre types de classes sont identifiables sur le MM de la figure 3.4 en fonction de leur couleur :

- Les classes « processus », en fond violet, correspondent à la définition du contexte des activités d'un point de vue des projets et des processus.
- Les classes « activités », en fond rouge, servent à la définition des activités et à la capitalisation de leur contexte (les traces).
- Les classes « supports », en fond jaune, servent à définir les différents objets qui constituent le contexte de réalisation de l'activité, que ce soient des données d'entrée, des contraintes, des ressources ou encore des données de sortie.
- Les classes « composants », en fond bleu, correspondent à des objets précis du processus dans lequel ils s'inscrivent, par exemple les principaux produits fabriqués ou les principaux modèles utilisés, avec pour attributs les caractéristiques descriptives propres à chaque objet comme des paramètres géométriques ou des définitions de matériaux.

La classe **Project** permet de modéliser les différents projets dans lesquels s'inscrivent les activités industrielles, en particulier à travers les attributs suivants :

- `projectName` : nom du projet.
- `projectDescription` : description des principaux enjeux du projet, pouvant inclure le détail sur les partenaires, les lots de travaux ou encore les problématiques identifiées.
- `projectType` : détaille le type de projet, souvent classifié comme étant type « équipementier » ou « de recherche », les deux n'offrant pas exactement la même structure dans le processus ni même les mêmes enjeux et sources de financement comme expliqué dans le premier chapitre.

Cette classe **Process** est directement reliée à la classe **Project** et renseigne sur les différentes phases du processus qui constituent le processus global du développement du projet. On retrouve donc dans cette classe les caractéristiques suivantes :

- `processName` : définit le nom du processus.
- `processDescription` : propose une définition du processus, avec les objectifs ciblés, les données d'entrée ainsi que les livrables attendus par exemple.
- `processCreator` : renseigne sur le créateur, l'initiateur, du processus.

### 3.2. MÉTA-MODÈLE DE CAPITALISATION DES CONNAISSANCES

---

Les classes « activités », donc en rouge, sont celles qui capturent l'essence du contexte QQQCOP. Pour qualifier ce lien, il existe la relation `hasContext` entre les classes **Activity** et **ActivityInputControlRessourceOutput**. Cette relation aide à spécifier que le contexte de la classe **Activity** est caractérisé par les objets de la classe **ActivityInputControlRessourceOutput**. De même, la classe **ActivityInputControlRessourceOutput** est caractérisé par un lien `isAnICROData`, où ICRO traduit *Input-Context-Ressource-Output*. Ce lien est dirigé depuis n'importe quelle classe susceptible d'être classée dans une telle catégorie de l'activité. La classe centrale de la capitalisation est **Activity**, et structure les caractéristiques principales des activités clés du processus d'ingénierie dans :

- `activityName` : nom de l'activité en question.
- `activityDescription` : description de l'activité pouvant inclure les données d'entrée, les objectifs et/ou la méthode utilisée.
- `realStartDate` : définit la date réelle de commencement de l'activité.
- `realEndDate` : définit la date de fin effective de l'activité.
- `plannedStartDate` : enregistre la date de début prévisionnelle de l'activité, si elle était prévue.
- `plannedEndDate` : enregistre la date de fin prévisionnelle de l'activité, si elle était prévue.
- `activityCreator` : identifie le créateur de l'activité dans la base de trace du MM.
- `activityUser` : identifie la personne en charge de la réalisation de l'activité, qui peut être différente de la personne qui enregistre l'activité dans la base.
- `activityJustification` : attribut clé pour l'identification des prises de décision et des choix techniques puisqu'il enregistre la raison de la réalisation de l'activité. Cela permettrait par exemple, bien que ça ne soit pas directement l'objet de ces travaux, d'identifier des liens entre la structure du processus ou les résultats obtenus et les choix de réalisation des activités et les données d'entrée.
- `activityRemark` : cet attribut permet d'ajouter des commentaires lors de la réalisation des activités, ce qui permet d'explicitier des risques ou des inconnues qui pourraient exister, sur les données d'entrée par exemple.
- `activityPlace` : ce dernier attribut capture le lieu de réalisation de l'activité.

Durant le processus industriel, plusieurs activités s'enchaînent en série mais également en parallèle pour aboutir à un résultat final. Cet enchaînement des différentes activités peut être enregistré grâce aux relations `isPrecededByAnteriorActivity` et `isFollowedByNextActivity` qui identifient les activités précédentes et/ou suivantes lorsqu'elles existent. Pour l'activité  $i$ , il peut ainsi exister entre aucune et une multitude d'activités précédentes issues de l'étape  $i - 1$ , de même qu'elle peut être la base d'aucune à plusieurs activités  $i + 1$ .

La capitalisation des éléments de contexte, donc les données d'entrée, les contraintes, les ressources et les données de sortie, est effectuée dans la classe **ActivityInputControlRessourceOutput**. C'est autour de cette classe que toutes les autres classes « supports » (en jaune sur la figure 3.4) s'articulent. Elle est composée des attributs :

- `activityInputControlRessourceOutputName` : renseigne sur le nom de l'élément caractéristique du contexte de l'activité.
- `type` : attribut qui permet de caractériser si le lien identifié est une *Input*, un *Control*, une *Ressource* ou une *Output*, par exemple à travers une liste de choix.

### 3.2. MÉTA-MODÈLE DE CAPITALISATION DES CONNAISSANCES

---

- `description` : renseigne sur la relation à la classe **Activity** des données d'entrée, des contraintes, des ressources ou des données de sortie.
- `value` : renseigner sur les valeurs que certaines classes pourraient prendre, par exemple pour les éléments de la classe **Parameter**.

La caractérisation du lien que peut avoir chacune des classes supports dans la réalisation de l'activité est essentielle pour capitaliser à la fois sur les données, à travers les paramètres par exemple, mais également sur les informations et connaissances par l'intermédiaire de documents comme des rapports, des procédures ou des méthodes qui vont soutenir l'utilisateur dans la réalisation de sa tâche.

Enfin, les classes supports ainsi que les classes composants servent à décrire avec la granularité et la richesse souhaitée le contexte de chaque activité. Par exemple, la classe **Model** identifie les différents modèles à disposition des utilisateurs, à travers une synthèse du nom, de la date à laquelle il a été validé et de si cette validation est toujours d'actualité respectivement avec les attributs `modelName`, `validationDate` et `validity`. Si l'utilisateur souhaite avoir plus de détails sur les paramètres ou les caractéristiques d'un modèle spécifique, ces informations sont structurées dans les classes **Submodel i**. Cette structure de MM ajoute autant de composants que nécessaire dans la structure globale, ce qui permet de satisfaire à la fois les critères d'évolutivité et de granularité. Le même type de construction se retrouve avec la classe **Product** pour capitaliser les différents produits d'abord d'un point de vue générique dans cette classe, puis d'un point de vue détaillé dans les classes **Subproduct i**.

La principale différence entre le MM proposé et les autres modèles formels de la littérature est la souplesse d'utilisation pour la capitalisation. En effet, la classe **ActivityInputControlResourceOutput** sert à bien caractériser chaque élément dès son apparition ou utilisation dans le PDP, et en capturant la dynamique. Par exemple, le développement et la formalisation d'une méthode de calcul dans un document écrit correspondent à une première activité qui convertit des connaissances (en entrée) en un document (en sortie). Or, dès lors que ce document sera réutilisé lors de futures activités, il sera caractérisé comme une ressource. La capture de ces changements de caractéristiques aide à capitaliser avec plus de justesse les processus métier qui sont réellement réalisés. La difficulté est alors sur l'implémentation d'un système de mesure qui puisse capturer tous ces éléments sans être invasif pour les concepteurs.

Avec la définition du MM de capitalisation, nous venons de construire notre modèle (formel) de capitalisation et réutilisation des connaissances. Il s'agit de la deuxième composante identifiée en section 2.2.1 pour implémenter une méthode KBE, la dernière étape le développement des outils pour répondre au cas d'usage. Le système KBE est développé dans la section 4.1, où le logiciel KANO est présenté pour le cas d'usage du PDP de l'entreprise Nexteam Group.

### 3.3. DÉFINITION DU SYSTÈME DE MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

### 3.3 Définition du système de mesure de la performance développée

Cette section présente le système de mesure de la performance d'un PDP qui intègre des systèmes KBE. Le système de mesure évalue les différents composants du PDP pour tenir compte de l'impact des outils métier et des activités de capitalisation sur la performance du PDP, qui n'étaient pas considérées d'après l'analyse de l'état de l'art. Ce système de mesure est également conçu pour s'intégrer facilement dans le PDP, sans être invasif pour les utilisateurs.

Suite à l'analyse de l'état de l'art, nous avons identifié des indicateurs à réutiliser et des indicateurs à adapter pour constituer le système de mesure souhaité, dont la synthèse est présentée en figure 2.15. La figure 3.5 présente le PDP avec le système de mesure proposé tel qu'il sera implémenté dans le chapitre 4. Les KPI sont présentés à la sortie de chacune des composantes du PDP : les activités et processus métier (en bleu), les outils métier (en vert) et enfin le processus de capitalisation (en rouge). La section est organisée en trois parties, autour de ces trois composantes, de la façon suivante :

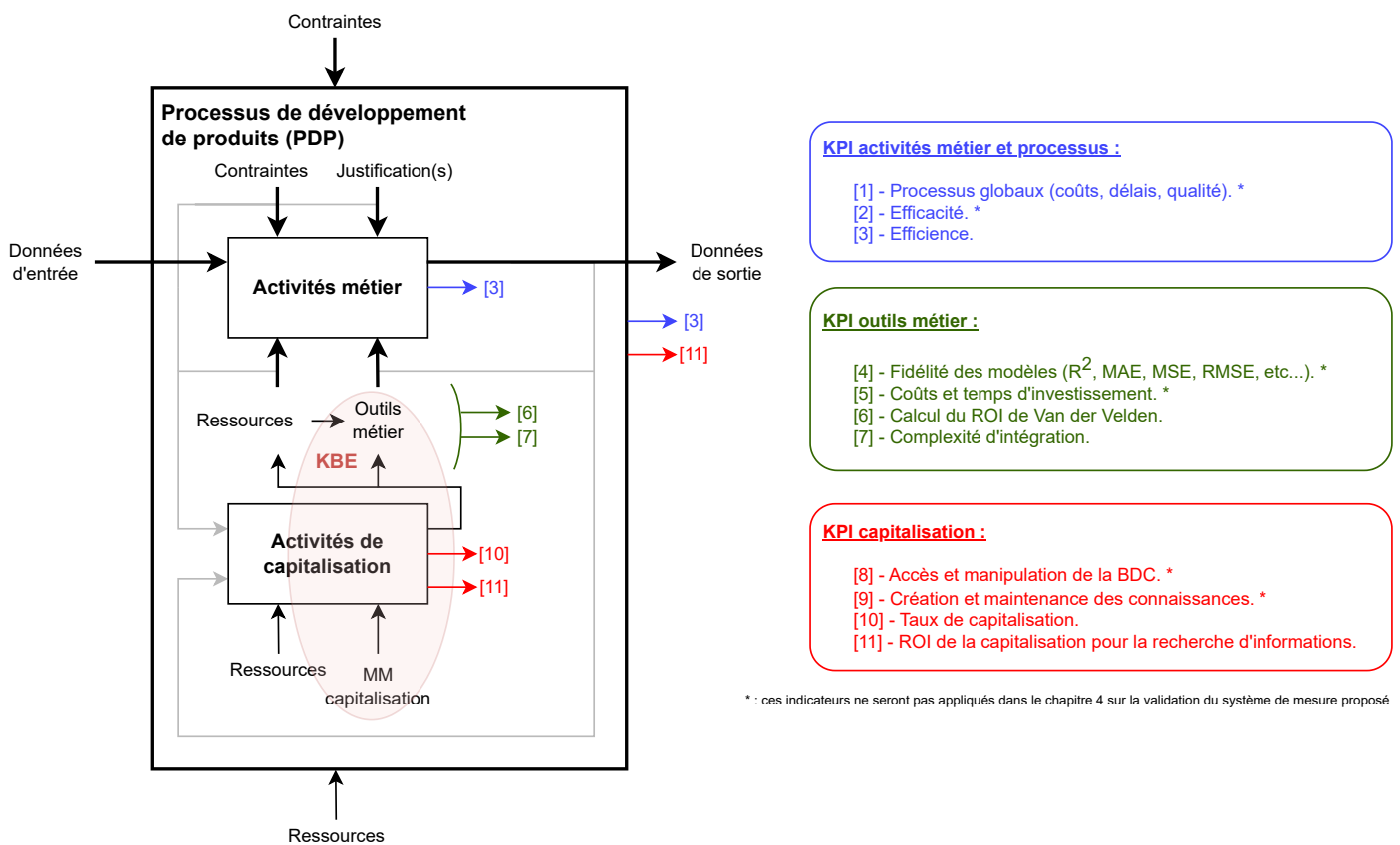


FIGURE 3.5 – Synthèse des indicateurs utilisés dans le système de mesure proposé pour évaluer les gains de performance apportés par le KBS

### 3.3. DÉFINITION DU SYSTÈME DE MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

- La première partie concerne le développement des KPI relatifs aux outils métier, avec la définition d'un indicateur de complexité d'intégration d'un outil dans un PDP. Il s'agit également de mettre en lien ce KPI de complexité avec le calcul du ROI réutilisé des travaux de [22].
- La deuxième partie traite les indicateurs de performance des activités métier, avec l'approfondissement des KPI d'efficience et de performance pour pouvoir les appliquer à des activités de conception.
- La troisième partie détaille les indicateurs pour évaluer la performance des activités de capitalisation. Pour cela, nous adaptons des KPI sur les gains de temps pour estimer le ROI du développement et de l'utilisation d'un système de capitalisation des connaissances. Nous adaptons également les indicateurs sur les connaissances capitalisées en un KPI de taux de capitalisation qui renseigne sur le degré d'informations capitalisées à chaque activité.

La proposition de système de mesure regroupe, par définition, plusieurs indicateurs. Pour rappel, nous cherchons à quantifier la variation de performance du PDP en fonction du choix, de l'implémentation et de l'utilisation des outils métier utilisés en tant que ressources pour la réalisation des activités métier. Nous n'avons pas proposé un seul KPI qui traduit à lui seul la performance du PDP. Le système de mesure proposé est à considérer comme un ensemble d'indicateurs pour évaluer la performance à des niveaux stratégiques. Dans notre cas, pour évaluer la performance de systèmes KBE, notre étude est axée sur la performance des activités et processus métier, la performance de l'outil KBE et enfin sur la performance du processus de capitalisation des connaissances, qui a pour finalité la réutilisation et valorisation des connaissances capitalisées. L'évaluation des gains de performance qu'apporte un outil se fait donc en considérant les différents KPI et en surveillant les niveaux les plus critiques en fonction des objectifs et du contexte propre à chaque cas d'étude.

Maintenant que le système de mesure est présenté dans son ensemble, les sous-sections suivantes détaillent la construction et l'analyse des indicateurs proposés, en commençant par la définition de la complexité d'intégration des outils métier.

#### 3.3.1 Mesure de la complexité des outils métier

Le premier indicateur du système de mesure présenté sert à caractériser la complexité d'intégration d'un outil dans un PDP. Ce KPI a vocation à évaluer l'intérêt de développer un système KBE comme nouvelle ressource d'une activité de conception, en plus des outils conventionnels. Plusieurs choix d'outils s'offrent au concepteur qui souhaite réaliser une tâche, et arbitrer entre ces différents choix n'est pas toujours évident car il est difficile de quantifier l'impact qu'aura le choix d'un outil sur les performances finales du processus. Nous avons mis en avant dans l'analyse de l'état de l'art qu'il existe différents indicateurs de complexité (structurelle, logicielle, calculatoire, algorithmique, etc...) mais qui n'offrent pas toujours des analyses simples sur l'état de la situation. En particulier, beaucoup d'indicateurs impliquent de devoir modéliser le processus pour pouvoir étudier des alternatives, ce qui résulte en une démarche coûteuse en temps. Le choix de développer des outils KBE est à considérer comme un investissement, avec un temps et un coût de développement à déterminer en fonction des

### 3.3. DÉFINITION DU SYSTÈME DE MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

objectifs, et donc il est nécessaire de comparer ce nouvel outil avec les outils à disposition des utilisateurs pour la réalisation d'une tâche.

Pour répondre à ce besoin de comparer simplement et rapidement des outils entre eux, pour la résolution d'une tâche spécifique équivalente, les quatre critères suivants sont considérés comme étant fortement dépendant du choix final de l'outil :

- **Le temps de développement de l'outil** : comptabilise le temps d'implémentation comme du temps passé à développer, à coder ou bien à paramétrer l'outil. Ces temps sont quasiment nuls pour l'utilisation de logiciels commerciaux à utiliser tels qu'achetés, ou bien très longs à paramétrer comme les ERP. Il peut cependant exister des coûts financiers liés à l'utilisation de licences, mais ils ne sont pas considérés dans l'évaluation de la complexité d'intégration proposée, car les coûts des différents outils doivent être comparés entre eux et avec la capacité de dépense. Le développement d'un outil est réalisé dans des délais variables en fonction du nombre de personnes, de leur expérience et du besoin final des utilisateurs.
- **Le temps d'utilisation de l'outil** : caractérise le temps passé par un utilisateur pour réaliser la tâche. Ce temps varie d'un utilisateur à un autre car il est dépendant de l'expérience technique, des compétences, propres à chaque utilisateur ainsi qu'à leur expérience d'utilisation de l'outil.
- **L'expérience utilisateur** : quantifie les prérequis initiaux de l'utilisateur énoncés précédemment, donc les prérequis techniques et les prérequis d'utilisation de l'outil. La mesure de l'expérience utilisateur par la seule mesure du temps de formation est réductrice, occultant la vitesse d'apprentissage propre à chacun ou encore la sensibilité de chacun sur différents sujets, mais représente un premier indicateur pertinent pour estimer un ordre de grandeur de l'expérience passée sur un outil, une technologie et/ou une expertise technique. Plus généralement, ce temps doit être considéré comme le temps de formation requis pour la réalisation de la tâche avec l'outil considéré. C'est une variable qui sera probablement amenée à évoluer dans le temps, mais représente les conditions à un instant donné. Il existe également une part de variabilité dans la définition de la valeur en raison de l'absence de standardisation, qui pourrait être basée sur des consensus ou des moyennes de relevés.
- **Le temps masqué de l'outil** : ce dernier temps correspond au temps pendant lequel l'opérateur n'est plus actif durant l'activité et doit laisser l'outil réaliser sa tâche en fond. Ces temps sont par exemple les temps d'entraînement de réseaux de neurones en IA ou encore le calcul des modèles EF.

L'objectif recherché est d'obtenir un indicateur global du niveau de complexité d'intégration d'un outil dans le processus de conception. Pour cela, une combinaison des quatre dimensions énoncées précédemment est à trouver pour refléter cette complexité d'intégration de l'outil. Pour définir ce KPI, chacune des quatre dimensions est évaluée sur une échelle allant de 1 à 10 pour quantifier les durées des paramètres requis. Ces niveaux sont construits selon le retour d'expérience de l'entreprise Nexteam Group, et suivent globalement une échelle exponentielle. La proposition de niveau pour chaque critère est exposée dans le tableau 3.1.

### 3.3. DÉFINITION DU SYSTÈME DE MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

TABLE 3.1 – Positionnement des niveaux de chaque critère de complexité d’intégration d’un outil

Niveau associé	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temps développement outil ( <i>TD</i> )	<= 30 min	>30 min	>1h	>8h	>1 S	>2 S	>1 M	>3 M	>6 M	>12 M
Temps utilisation outil ( <i>TU</i> )	<= 30 min	>30 min	>1h	>2h	>4h	>8h	>3 J	>1 S	>2 S	>1 M
Besoin exp. utilisateur ( <i>EXP</i> )	<= 30 min	>30 min	>1 h	>8h	>1 S	>2 S	>1 M	>3 M	>6 M	>12 M
Temps en fond ( <i>TC</i> )	<= 1 min	>1 min	>15 min	>30 min	>1h	>4h	>8h	>3 J	>1 S	>2 S

min : minute(s), h : heure(s), J : jour(s), S : semaine(s), M : mois

Il a été vu précédemment que le temps d’utilisation est fortement dépendant de l’expérience de l’utilisateur : un utilisateur expérimenté termine généralement plus rapidement qu’un débutant une tâche en utilisant les mêmes outils, en particulier si l’outil nécessite un prérequis technique. Si l’outil en question ne présente pas de difficultés à l’usage alors les deux profils, débutant et expérimenté, devraient réaliser la tâche dans une durée similaire. En somme, l’indicateur doit avoir une valeur élevée si le temps d’utilisation (*TU*) et le besoin de formation préalable (*EXP*) sont élevés. Il doit avoir une valeur faible si les indicateurs *TU* et *EXP* sont faibles. Enfin, il doit avoir une valeur moyenne s’il y a un déséquilibre entre les deux temps observés. De fait, la moyenne des scores de ces critères lie les deux paramètres influents dans le critère de complexité d’intégration d’un outil en suivant les tendances souhaitées. Les deux critères restants sont ensuite sommés avec la moyenne obtenue pour former le critère de complexité de mise en œuvre d’un outil, noté *C*, et qui est défini comme suit. La valeur de ce KPI est également mis à l’échelle avec une valeur maximum de 1, en divisant le total obtenu par 30, qui est le montant des scores maximums obtenus par *TU*, *EXP*, *TD* et *TC*.

$$C = \frac{TD + \frac{TU+EXP}{2} + TC}{30}$$

Pour aider les utilisateurs à positionner les outils dans leur PDP, une échelle de lecture est proposée avec l’indicateur de complexité d’intégration. Il est trivial qu’un outil avec tous ses paramètres à des seuils élevés est difficile à intégrer dans un PDP. Il est plus commun d’avoir des outils avec un seul des paramètres, ou deux au maximum, avec des valeurs élevées. En considérant les niveaux atteints par différents outils, tels qu’illustrés dans le tableau 3.3, l’échelle à cinq niveaux suivante est définie dans le tableau 3.2.

TABLE 3.2 – Echelle d’évaluation de la complexité d’intégration d’un outil dans le processus

Complexité d’intégration	Seuil
Très faible	< 0.15
Faible	> 0.15
Modérée	> 0.30
Elevée	> 0.45
Très élevée	> 0.60

Pour illustrer l’utilisation de ce KPI, nous comparons entre eux la complexité d’intégrer trois différents outils généralement utilisés dans un processus de conception, dont les scores de l’indicateur *C* sont estimés et présentés dans le tableau 3.3.

### 3.3. DÉFINITION DU SYSTÈME DE MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

Les trois ressources considérées sont :

- Le tableur est un des outils les plus utilisés dans les BE en raison de sa grande souplesse d'utilisation. Il est en général utilisé pour structurer les informations et renvoyer un résultat rapide. Le logiciel peut être payant mais à un prix relativement peu élevé.
- Les logiciels commerciaux sont des outils indispensables pour réaliser des tâches plus avancées comme la modélisation, la mise en plan ou les calculs éléments finis. Les gains en temps et en précision des résultats s'obtiennent contre l'achat du logiciel ou de licences d'utilisation.
- L'outil KBE n'existe pas « sur étagère » puisque, d'après l'état de l'art, il n'existe pas d'outils génériques adaptés à leur implémentation, et il faut donc intégralement le développer. Cela induit des coûts liés aux ressources temps-homme à mobiliser et du temps de développement, mais dans l'objectif de réaliser l'activité beaucoup rapidement qu'avec les outils précédents.

TABLE 3.3 – Comparaison de trois outils génériques d'une activité de conception

Paramètre	Notation	Outil tableur	Outil commercial	Outil KBE
Temps de développement	TD	1	1	8
Temps d'utilisation	TU	1	6	2
Besoin d'expérience	EXP	1	6	2
Temps masqué	TC	1	2	2
Complexité d'intégration	C	0.10	0.30	0.40

La présentation des ressources à disposition des utilisateurs dans ce type de tableau offre une vue d'ensemble sur les forces et faiblesses de l'utilisation de chaque outil. L'exemple du tableau 3.3 montre clairement que le tableur est toujours un outil très simple à implémenter et à utiliser comparativement aux deux autres options. Ses limites sont cependant liées à la difficulté de réaliser des tâches complexes et de capitaliser les actions menées au travers de ces tableurs. Notons toutefois que ces limites ne sont pas capturées par l'indicateur de complexité proposé, ce qui nécessite de compléter l'analyse avec d'autres KPI. Il apparaît ensuite qu'un outil commercial est plus simple à intégrer qu'un système KBE, ce qui est conforme à ce qui s'observe chez les industriels : les logiciels commerciaux sont omniprésents tandis que les logiciels développés en interne sont beaucoup plus rares. Cela s'explique par la diversité des tâches qu'un outil commercial va aider à résoudre, son choix résultant de sa capacité être le plus utile possible sur un maximum de tâches et pour le coût le plus faible possible. Au contraire, un KBE peut faire gagner du temps aux utilisateurs sur des activités mais est limité à la réalisation d'actions spécifiques, ce qui empêche la généralisation de son utilisation. C'est pour cela que ce type d'outil est à favoriser pour les activités récurrentes, en espérant un ROI à travers l'automatisation des tâches répétitives. Une autre limite identifiée de l'indicateur  $C$  est l'absence de prise en compte de la fréquence d'utilisation d'un outil, qui est un critère important à considérer pour évaluer la performance développée sur plusieurs activités ou PDP.

Ce KPI offre une pondération de l'impact que va avoir le choix d'utilisation d'un outil pour la réalisation d'une activité, mais la comparaison de trois outils génériques a mis en avant les limites de l'indicateur suivantes :

### 3.3. DÉFINITION DU SYSTÈME DE MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

- Pas de prise en compte de la fréquence de réalisation de cette activité. Il est possible de compléter cet indicateur avec directement le nombre d'utilisations prévues d'un outil, ou bien avec le calcul de ROI défini par Van der Velden [22], qui identifie le seuil de rentabilité en fonction du nombre d'utilisations supposé. Deux outils considérés pour une même tâche risquent d'avoir un nombre d'utilisations prévues similaires, mais leur seuil de rentabilité peut être très différent, d'où l'intérêt du calcul de ROI.
- Pas de prise en compte de la qualité ou précision des résultats obtenus par un outil comparativement à un autre. Cette dimension est possible à considérer avec les KPI, identifiés comme à conserver dans le système de mesure dans l'état de l'art, tels que le  $R^2$ , la MAE ou la RMSE. Le couplage de la complexité d'intégration avec la fidélité des outils utilisés renseigne sur les outils à favoriser en fonction du degré de précision attendu pour une tâche, et il est en général admis que plus la tâche requiert un niveau de précision important et plus l'outil à utiliser risque d'être complexe à intégrer (car il sera difficile à utiliser, ou long à utiliser, etc...).
- Pas de prise en compte de la gestion des connaissances associées à l'outil. En effet, si un des outils comparés sert à capitaliser et réutiliser des connaissances, il apportera potentiellement des bénéfices à long terme qui ne sont pas captés par l'indicateur de complexité d'intégration. Un des bénéfices à long terme peut être estimé avec le calcul de ROI de la capitalisation proposé en section 3.3.3.

La figure 3.6 illustre la combinaison des indicateurs de ROI d'automatisation, via la fréquence d'utilisation, et de la complexité d'intégration. D'après ce graphique, les outils utilisés de nombreuses fois et avec une complexité faible sont intéressants à développer. À l'inverse, si la complexité d'intégration est élevée mais que l'outil est peu utilisé, il ne semble pas pertinent de le développer car le seuil de rentabilité ne sera jamais atteint. La plus-value du calcul du ROI apparaît pour déterminer l'intérêt du développement autour de la zone intermédiaire. Cette zone, à la frontière entre la zone d'intérêt triviale et la zone de non-intérêt triviale, est à traiter au cas par cas en fonction du contexte de chaque étude.

Cette figure montre le besoin d'avoir une forte utilisation d'un outil (prévisionnelle puis avérée), qui a une complexité d'intégration élevée (donc avec des prérequis de développement, de formation, d'utilisation ou de temps masqués importants), pour atteindre le seuil de rentabilité. Les bornes tracées sur ce schéma sont illustratives, et sont à ajuster suivant les contextes d'études, les secteurs d'activité ou bien le type de produit développé. Dans notre contexte d'étude, pour le développement de produits aéronautiques à forte valeur ajoutée, la figure semble en accord avec l'environnement de l'étude. Pour en revenir à l'indicateur de complexité d'intégration sur cette figure, nous souhaitons maximiser le positionnement des outils dans le triangle supérieur gauche (en rouge). Pour cela, les paramètres à disposition sont les quatre variables (TD, TU, EXP et TC), et ceux qui vont en général poser le plus de contraintes sont le temps de développement de l'outil, le temps d'utilisation de l'outil et le besoin d'expérience ou de formation pour réaliser la tâche. La diminution de ces variables dirige le positionnement vers la gauche du graphique, tandis que la diminution du temps de développement améliore également fortement le ROI associé.

### 3.3. DÉFINITION DU SYSTÈME DE MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

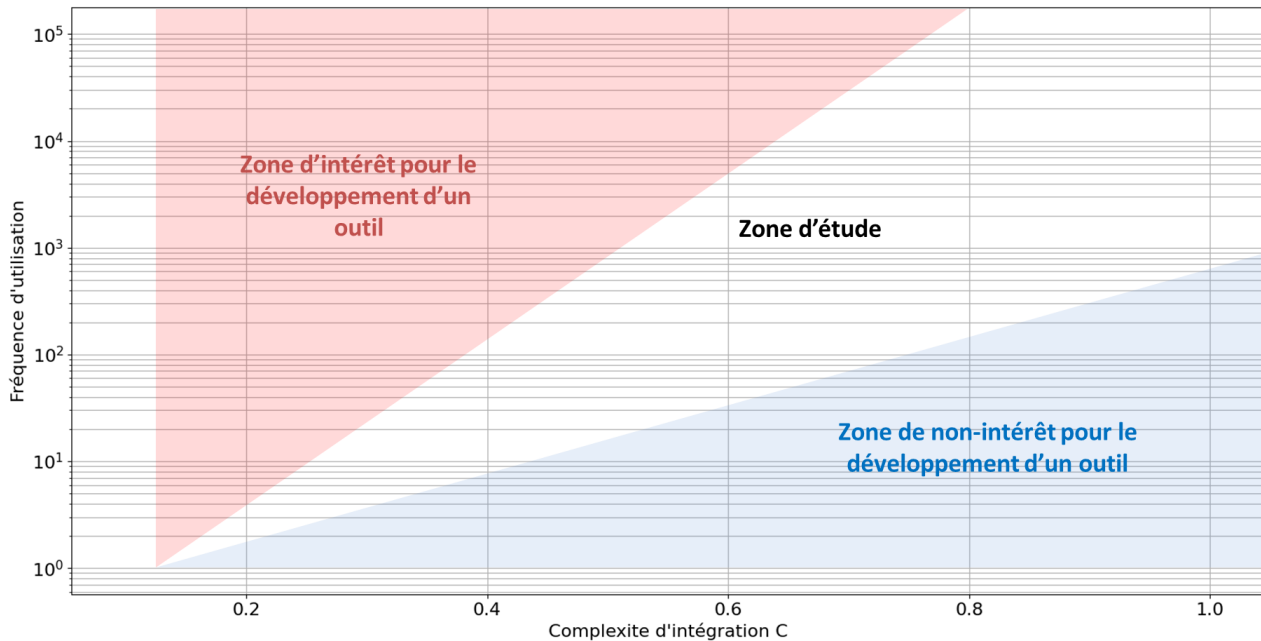


FIGURE 3.6 – Identification des zones d'intérêt pour développer des outils en fonction de la fréquence prévisionnelle d'utilisation

Finalement, le couplage du KPI de complexité d'intégration et du calcul de ROI prévisionnel offre une idée des perspectives de performance de l'utilisation de l'outil étudié, comparativement au nombre d'utilisations prévisionnelles. Dans le cas particulier du développement d'un système KBE, ces indicateurs sont de bons moyens de définir les cas d'usage pour lesquels il est pertinent d'implémenter ce type de solution. La démonstration de l'application de cet ensemble de KPI sera réalisée sur le cas de l'application métier KANO, développée dans le cadre de cette thèse, dans le prochain chapitre.

#### 3.3.2 Mesure de la performance des activités et du processus

Cette section présente le système de mesure de la performance d'un PDP, et également des activités métier. La mesure de la performance à l'échelle de l'activité est nécessaire pour contextualiser et analyser la performance globale du PDP, qui est un enchaînement d'activités métier. Pour rappel, les travaux de Cedergren et al. [17, 18] et de Yin et al. [233] ont été identifiés dans l'analyse de l'état de l'art, et proposent des moyens pour évaluer la performance locale (activité) et l'extrapoler à une performance globale (processus). Il a été vu précédemment que ces approches donnent une indication de la performance à travers l'étude de deux KPI que sont l'efficacité et l'efficacité, bien que l'application de ces deux indicateurs demeure théorique et difficile à implémenter en pratique. Cedergren rappelle également qu'un processus peut être efficace, efficace, les deux à la fois ou aucun des deux, et la performance découle de la combinaison de ces deux indicateurs.

### 3.3. DÉFINITION DU SYSTÈME DE MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

Pour rappel, dans la littérature scientifique, l'efficacité d'une activité est définie par le niveau de conformité obtenu en sortie de l'activité au regard des objectifs ou exigences initiaux. Cette mesure est définie par une relation, souvent la différence, entre les sorties et les objectifs. C'est donc théoriquement une valeur bornée entre "0" (aucune exigence n'est atteinte) et "1" (toutes les exigences sont atteintes). Cette définition est utilisée par Cedergren [17, 18] et O'Donnell et Duffy [16], tandis que Yin et al. [233] utilisent une définition différente où le gain (les sorties moins les entrées) est divisé par les objectifs, ce qui a pour effet de ne plus donner une définition de l'efficacité bornée si les résultats dépassent largement les objectifs initiaux de l'activité ou du processus.

L'efficience, quant à elle, se caractérise par le gain obtenu par l'activité en comparaison des ressources dépensées pour l'obtenir. O'Donnell et Duffy supposent qu'il est possible de mesurer l'état des connaissances, ce qui définit l'efficience comme le gain de connaissance obtenue (ce qui s'apparente aux sorties dont on soustrait les entrées) comparativement aux ressources dépensées pour l'obtenir. Cette approche repose sur trois hypothèses que sont la capacité à mesurer le niveau des connaissances, la capacité à exprimer les connaissances sous une forme explicite et manipulable et enfin que les sorties, les entrées ainsi que les ressources puissent être formalisées ou converties sous cette même forme. Cependant, aucun outil ou méthode n'a été proposé conjointement pour traiter ces hypothèses dans les travaux étudiés et il n'existe pas dans la littérature de cas d'application des méthodes d'évaluation des PDP proposées.

L'objectif de cette proposition est de définir un cadre et un formalisme commun pour réaliser la mesure de l'efficacité et de l'efficience d'une activité, ce qui correspond à l'obtention d'une image de la performance développée. Pour cela, nous proposons le modèle de mesure de la performance, en figure 3.7, qui s'intègre dans le PDP. Ce modèle s'appuie sur la représentation IDEF0 et intègre l'efficacité et l'efficience au PDP, qui est décomposé comme une suite d'activités qui s'enchaînent pour réaliser différents sous-objectifs, et dont la finalité est de répondre à l'objectif global du processus de conception : « développer un produit conforme aux exigences spécifiées avec des coûts et des délais maîtrisés ».

Chaque activité du PDP de la figure 3.7 suit la même structure que le processus dans son ensemble : les objectifs, les entrées, les sorties et les ressources sont identifiés à l'échelle de chaque activité, et les calculs de l'efficacité et de l'efficience sont appliqués localement.

Les objectifs du processus  $o_i$  sont définis par décomposition de l'objectif global  $O$  en sous-objectifs des tâches à réaliser. Chaque activité du processus existe donc pour répondre à un sous-objectif  $o_i$ , dont la somme des objectifs permet d'atteindre l'objectif global  $O$  du processus tel que :

$$O = \sum_{i=1}^n o_i$$

De même, la somme des ressources consommées par activité  $r_i$  donne le total des ressources consommées  $R$ , soit :

$$R = \sum_{i=1}^n r_i$$

### 3.3. DÉFINITION DU SYSTÈME DE MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

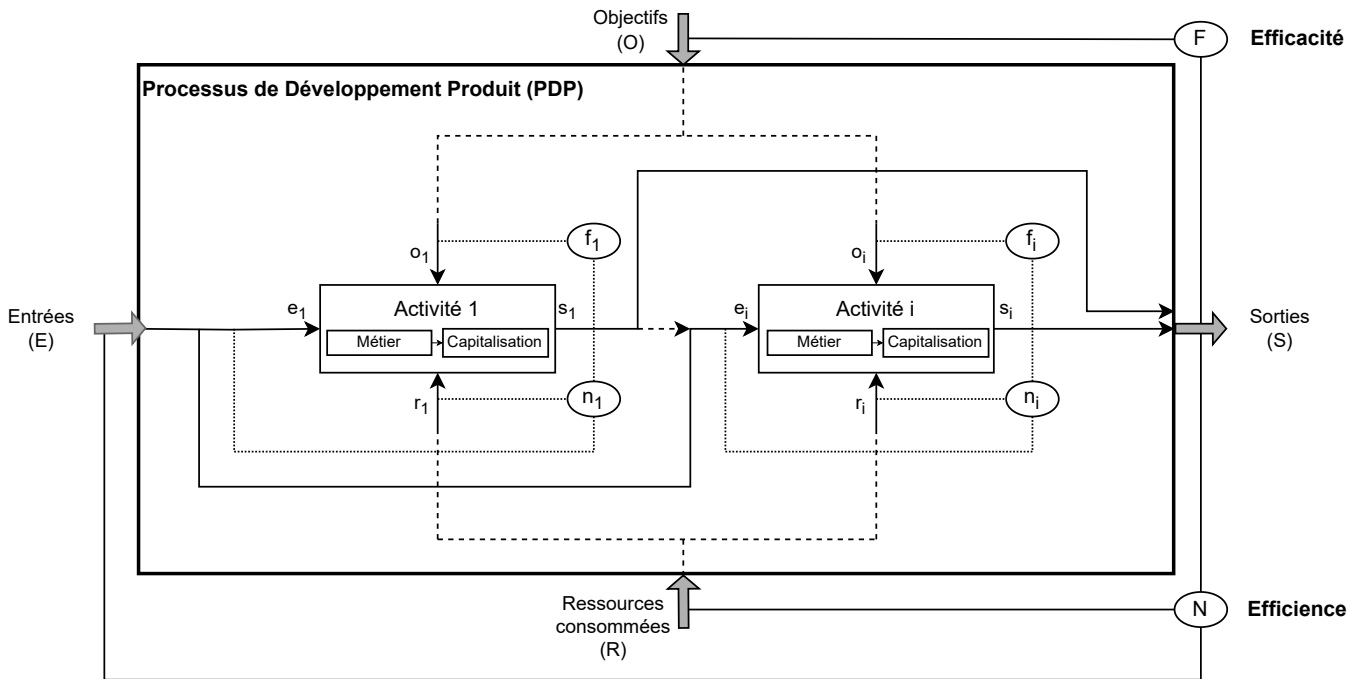


FIGURE 3.7 – Mesure de l'efficacité et de l'efficacité d'un processus

Ces ressources sont décomposées en une partie financière, le coût de l'activité  $c_i$ , et en une partie temporelle, le temps passé sur l'activité  $t_i$ . Ce dernier est par ailleurs de nouveau décomposable en un temps de recherche d'informations  $t_{ri}$ , en un temps de réalisation de l'activité  $t_{ui}$ , et en un temps de capitalisation de l'activité  $t_{ci}$ . La première durée représente le temps passé par l'utilisateur à rechercher les informations essentielles pour réaliser l'activité. Cela inclut par exemple la recherche des données nécessaires, la recherche des méthodes ou encore l'analyse de l'existant. La deuxième durée correspond à la réalisation pure l'activité, comme l'implémentation de la méthode à appliquer et l'analyse et validation des résultats obtenus. Enfin, la durée de capitalisation représente la mesure du temps passé à formaliser les résultats obtenus dans un format explicite qui facilite une réutilisation future, généralement sous la forme d'un rapport d'étude ou d'une sauvegarde dans une BDC.

Les entrées  $e_i$  correspondent aux données, modèles, documents, produits ou autres éléments qui seront utilisés et/ou transformés lors de la réalisation de l'activité. Le cumul de l'ensemble des entrées  $e_i$  donne la totalité des entrées requises  $E$  pour la réalisation du processus.

De même, les sorties  $s_i$  ont des formats similaires aux entrées et sont les résultats des activités. De façon analogue aux entrées, la sortie  $S$  du processus correspond à l'ensemble des sorties des activités du processus. Les résultats obtenus en sortie  $S$  peuvent être évalués par la réutilisation des KPI identifiés dans l'état de l'art, à savoir les indicateurs sur la fidélité des modèles (ou outils/ressources plus généralement) utilisés comme le  $R^2$ , la MAE ou encore la RMSE. Ainsi, en plus d'évaluer la performance à travers l'efficacité et l'efficacité, les concepteurs peuvent également avoir des informations sur la qualité des outils utilisés pour réaliser leurs tâches.

### 3.3. DÉFINITION DU SYSTÈME DE MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

L'efficacité locale évaluée pour chaque activité, notée  $f_i$ , informe sur le niveau de conformité atteint par les activités par rapport aux objectifs fixés. Sur l'étude de l'ensemble du PDP, l'efficacité est référencée par  $F$  et renseigne sur le niveau de conformité des résultats obtenus par rapport aux objectifs du processus de conception. Son niveau varie entre 0 et 1 en fonction du degré de conformité des objectifs satisfaits. Une valeur intermédiaire signifie qu'un certain pourcentage seulement des résultats de l'activité sont conformes aux objectifs attendus. La valeur de cet indicateur correspond aux taux de satisfaction des objectifs  $o_i$  obtenus par les données de sortie  $s_i$ . L'objectif de l'activité ne doit pas correspondre aux données de sortie qui sont souhaitées, mais bien aux résultats qui sont visés. O'Donnel et Duffy [16] illustrent par un exemple ce problème par l'utilisation d'un indicateur sur le « nombre de dessins (*drawings*) » pour mesurer la performance d'une activité de conception. Un objectif bien formulé est plutôt de « définir une géométrie de produit telle qu'elle permet de poursuivre le processus de développement et les analyses ». Finalement, ils identifient la facilité d'utilisation, la pertinence ou l'exhaustivité du dessin comme des KPI plus adaptés aux objectifs définis. Cet aspect est à considérer pour définir des objectifs des activités à réaliser dans le PDP.

Puis, l'efficacité est la deuxième composante de la performance et est exprimée comme le gain de connaissances obtenu divisé par les ressources dépensées pour l'obtenir. Comme cela a été expliqué, cette définition repose sur un certain nombre d'hypothèses comme le fait de pouvoir quantifier la connaissance et de parvenir à exprimer l'ensemble de ces informations sous la forme d'une même unité. Il a également été vu qu'une recommandation du DRM est de comparer les approches *as-is* aux approches *to-be* pour mesurer les différences et quantifier les variations de performance. Notre proposition de quantification de la performance repose sur une adaptation du KPI d'efficacité et sur la comparaison de plusieurs états, en lien avec les recommandations de la DRM. L'efficacité comme KPI de la performance développée n'est donc pas un indicateur absolu, mais un indicateur relatif par rapport à une situation donnée. Dans la mesure où la variation de connaissance est difficile à quantifier rigoureusement, et pour n'importe quel processus, nous posons en hypothèse que cette variation de connaissance est constante entre deux activités identiques qui sont comparées dans le cadre d'un processus *as-is* et d'un processus *to-be*. Cette hypothèse est justifiée dans la mesure où l'objectif et les données de sortie sont les mêmes, ou très proches, pour une même activité entre le processus *as-is* et *to-be*, seules les ressources utilisées changent pour apporter des moyens alternatifs à l'utilisateur. Cela induit quelques changements sur les données d'entrée également, mais le gain de connaissances global est équivalent. Cette hypothèse de « différence de connaissances constante » se manifeste par le terme « # » sur les formules ci-dessous. De fait, les indicateurs d'efficacité sont exprimés comme :

$$n_i^{as-is} = \frac{\#}{\alpha_1 c_i^{as-is} + \alpha_2 t_i^{as-is}} \quad \text{comparé à} \quad n_i^{to-be} = \frac{\#}{\alpha_1 c_i^{to-be} + \alpha_2 t_i^{to-be}}$$

Avec  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  des coefficients, compris entre 0 et 1 et dont la somme vaut 1, pour pondérer plus la dimension financière ou la dimension temporelle du coût de réalisation de l'activité. Dans cette définition, il est nécessaire de déterminer comment additionner la grandeur de coût  $c_i$  avec la grandeur temporelle  $t_i$ . Pour cela, l'utilisation d'un TJM (Taux Journalier Moyen) propre à l'entreprise est un moyen pour réaliser cette conversion d'une unité de coût vers une unité de temps, et inversement. Par exemple, un TJM de X € par jour peut se convertir en X € pour n heures avec la convention définie, ce qui donne une base de conversion spécifique à l'entreprise étudiée. On exprime le TJM comme X  $c_{tjm}/t_{tjm}$ . De cette façon, l'ensemble du dénominateur s'exprime sous la forme d'une unité temporelle, ou de coût, pondéré en fonction des coefficients souhaités  $\alpha_1$  ou  $\alpha_2$ .

### 3.3. DÉFINITION DU SYSTÈME DE MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

Il est également intéressant de noter que le dénominateur comprend dans le terme  $t_i$  à la fois le temps de recherche d'informations  $t_{ri}$ , le temps de réalisation de l'activité métier  $t_{ui}$  et le temps de capitalisation  $t_{ci}$ , tel que le temps total de l'activité est  $t_i = t_{ri} + t_{ui} + t_{ci}$ . Améliorer l'efficacité correspond à augmenter les connaissances produites (le numérateur), mais cette grandeur n'est pas quantifiable et constante d'après notre hypothèse. Sinon, l'indicateur d'efficacité peut augmenter par la diminution du dénominateur. Cela revient donc à diminuer le coût de l'activité  $c_i$  et/ou le temps total de l'activité  $t_i$ . Or, nous venons de voir que ce temps est décomposable en plusieurs temps ( $t_{ri}$ ,  $t_{ui}$ ,  $t_{ci}$ ), et tous ne présentent pas un intérêt à long terme d'être diminués. Les deux premiers temps sont des leviers directs et triviaux de l'efficacité par la réduction du temps de recherche des informations, parce que les informations de qualité sont rapidement accessibles à l'utilisateur, et par la réduction du temps de réalisation de l'activité, parce que les outils aident à réaliser l'activité rapidement sans dégrader la qualité des résultats. Cependant, la diminution du temps de capitalisation  $t_{ci}$ , pose question comme levier de performance. En effet, à court terme, il est évident qu'économiser ce temps aide à réaliser l'activité plus rapidement et donc par extension à concevoir un produit plus rapidement. Cependant, l'objectif est d'identifier dans quelle mesure les connaissances capitalisées pour un coût en temps certain pourront faire économiser ou de faire gagner du temps dans le futur. Il y a donc un intérêt à court terme mais pas nécessairement à long terme de ne pas capitaliser durant les activités.

Sur la base de ce KPI de l'efficacité, et avec l'hypothèse que les activités réalisées produisent la même différence de connaissances, le gain d'efficacité peut s'exprimer comme la variation d'efficacité entre l'état mesuré initial ( $as-is$ ) et l'état mesuré final ( $to-be$ ) pour une même activité ou un même processus, tel que :

$$\Delta N = \frac{n_i^{to-be}}{n_i^{as-is}} = \frac{\alpha_1 c_i^{as-is} + \alpha_2 t_i^{as-is}}{\alpha_1 c_i^{to-be} + \alpha_2 t_i^{to-be}} = \frac{\alpha_1 c_i^{as-is} \times \frac{t_{tjm}}{c_{tjm}} + \alpha_2 t_i^{as-is}}{\alpha_1 c_i^{to-be} \times \frac{t_{tjm}}{c_{tjm}} + \alpha_2 t_i^{to-be}}$$

En exprimant le gain d'efficacité ainsi, la diminution du temps de capitalisation  $t_{ci}^{to-be}$ , par rapport à  $t_{ci}^{as-is}$  apporte un gain de performance si on suppose le taux de capitalisation constant. Ce taux de capitalisation correspond à la richesse des éléments capitalisés et sera détaillé dans la prochaine sous-section. Finalement, toute diminution des mesures  $to-be$  fera diminuer le dénominateur de l'indicateur de variation d'efficacité, ce qui se traduit par une amélioration de la performance à travers l'amélioration de l'efficacité. L'équation de  $\Delta N$ , présentée ci-dessus, requiert des formulations des ressources  $as-is$  et  $to-be$  exprimées en unités temporelles (des durées). Suivant les cas de figure, la même approche est réalisable avec une formulation orientée sur les coûts, voir l'équation ci-dessous. Cette nouvelle formulation aide par exemple à considérer le coût horaire des concepteurs qui réalisent une activité.

$$\Delta N = \frac{n_i^{to-be}}{n_i^{as-is}} = \frac{\alpha_1 c_i^{as-is} + \alpha_2 t_i^{as-is} \times \frac{c_{tjm}}{t_{tjm}}}{\alpha_1 c_i^{to-be} + \alpha_2 t_i^{to-be} \times \frac{c_{tjm}}{t_{tjm}}}$$

Maintenant que l'indicateur de l'efficacité est défini entre le processus  $as-is$  et  $to-be$ , le prochain indicateur se concentre sur l'identification du ROI associé à la capitalisation des connaissances durant les processus. Cet indicateur aide à identifier les cas de figure où la capitalisation est utile pour la réutilisation future des informations, mais également pour positionner le curseur sur la capitalisation « au plus juste ».

#### 3.3.3 Mesure de la performance de la capitalisation des connaissances

##### Quantifier le Retour sur Investissement de la capitalisation des connaissances

D'après l'analyse de l'état de l'art réalisée, il n'existe pas d'indicateurs utilisés pour mesurer le temps de capitalisation lors de l'implémentation et l'utilisation de systèmes KBE. Il n'existe pas non plus d'indicateurs pour déterminer dans quelle mesure ces systèmes, grâce à la capitalisation, entraînent des gains de performance, en particulier en diminuant la durée des activités métier et donc des PDP. Une des raisons principales à l'absence de métriques est la longue durée dans laquelle s'inscrivent à la fois le développement des outils KBE mais également la réalisation des PDP dans lesquels ces outils sont utilisés. De ce fait, pour quantifier l'intérêt à long terme de capitaliser durant les activités métier, le gain de temps futur apporté par la capitalisation des connaissances doit être quantifié. Il faut pour cela s'appuyer sur les trois objectifs de la capitalisation des connaissances qui ont été identifiés dans l'état de l'art, et qui sont rappelés en suivant :

- Établir les liens entre les prises de décision et les résultats ;
- Améliorer la recherche d'informations ;
- Réutiliser les connaissances lors de futurs travaux.

Le temps passé à capitaliser doit améliorer un de ces objectifs pour justifier l'utilisation de ce temps. Le premier point ne fait pas l'objet de ces travaux, mais le lecteur intéressé pourra s'orienter vers les travaux de [15] pour approfondir le sujet. Les deuxième et troisième points sont directement la cible de ces travaux de thèse et de cette proposition. L'objectif des KPI à définir dans cette proposition sont de justifier dans quelle mesure la capitalisation des connaissances présente un gain futur, et comment déterminer la capitalisation « au plus juste » des connaissances. À travers cette problématique se posent alors les questions sur la quantification du ROI de la capitalisation des connaissances d'une part, et, d'autre part, la détermination du degré ou niveau de capitalisation approprié au processus pour capturer la majorité des informations utiles à l'avenir sans dépenser beaucoup de temps.

L'amélioration de la performance de la recherche d'informations par les concepteurs passe tout d'abord par l'émission d'une hypothèse : le temps moyen de recherche des informations  $t_{ri}$  est supérieur au temps moyen de capitalisation des informations  $t_{ci}$ . Si ce n'est pas le cas, alors il est plus efficient de rechercher les informations dans les différents silos de connaissances dès qu'elles ne sont pas immédiatement disponibles, plutôt que de passer du temps à les formaliser et les capitaliser dans l'espoir de les réexploiter à l'avenir.

La définition d'un indicateur de ROI passe par l'identification des grandeurs en jeu dans la capitalisation suivantes :

- $T_{Dev}$  est la durée nécessaire au développement d'une BDC et du moyen de capitalisation associé. Ce temps représente le principal coût (temporel) d'implémentation (hors coût financier) d'un moyen de capitalisation et de gestion des connaissances.
- $T_{Rech\_manuelle}$  correspond au temps moyen de recherche d'une information « manuelle », c'est-à-dire en dehors d'une BDC. C'est le temps de recherche des informations lors du processus *as-is*, ou durant le processus *to-be* lorsque les informations recherchées ne sont pas incluses

### 3.3. DÉFINITION DU SYSTÈME DE MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

dans la BDC. Cette grandeur est définie par la moyenne des temps mesurés  $t_{ri}$  précédemment présentés, avec  $k$  le nombre d'activités considérées pour calculer l'indicateur.

$$T_{Rech\_manuelle} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k t_{ri}$$

- $T_{Cap}$  est le temps moyen de capitalisation des connaissances dans la BDC par activité. Ce temps est dépendant du niveau de détail des informations capitalisées, du moyen de capitalisation utilisé ou encore de la fréquence de capitalisation dans les activités, certaines ne se prêtant pas à la capitalisation et d'autres étant exclusivement des activités de capitalisation.

$$T_{Cap} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k t_{ci}$$

- $T_{Rech\_bdc}$  est la mesure du temps moyen de recherche des informations requises dans la BDC. Ce temps est dépendant des moyens de gestion des connaissances utilisés, que ce soit à travers leur ergonomie ou leur richesse des connaissances capitalisables.
- $p$  correspond à la probabilité de trouver l'information souhaitée dans la BDC. Cette probabilité est à définir empiriquement en fonction de la richesse des informations qui seront potentiellement capitalisées dans la BDC et conditionnent la chance de retrouver les informations souhaitées à l'intérieur.
- $n$  est un paramètre du nombre de recherches qui seront effectuées à l'avenir. Plus le nombre de recherches dans la BDC est important et plus il y a de l'intérêt à développer une BDC. Cependant, un nombre de requêtes important à cette BDC signifie qu'il y aura un grand nombre d'informations capitalisées en son sein qui pourront être accessibles aux utilisateurs.

Les durées mesurées correspondent à des temps moyens pour donner une première estimation du ROI, mais elles pourraient être formulées comme des valeurs médianes ou des distributions de probabilités pour compléter le spectre des résultats et les analyses.

Le ROI se définit comme le rapport entre le coût certain, au numérateur, et le coût estimé apporté par un investissement au dénominateur. Dans notre cas d'étude, le coût certain est la recherche de  $n$  fois des informations pour une durée  $T_{Rech\_manuelle}$  dans les multiples silos de connaissances de l'entreprise et les connaissances extérieures (internet, fournisseurs, etc...). Le coût estimé de l'investissement est tout d'abord lié au temps de développement de la BDC et du système de gestion des connaissances  $T_{Dev}$ . Il faut ensuite ajouter les  $n$  recherches d'informations qui vont déboucher avec une probabilité  $p$  sur un résultat de la BDC, obtenue avec un temps  $T_{Rech\_bdc}$  et qui a nécessité une durée de capitalisation de  $T_{Cap}$ , sinon avec une probabilité  $1 - p$  de faire une recherche manuelle  $T_{Rech\_manuelle}$  dans les autres silos de connaissance. Cette définition construit alors le ROI de la capitalisation des connaissances comme :

$$ROI = \frac{n \times T_{Rech\_manuelle}}{T_{Dev} + n \times (p(T_{Cap} + T_{Rech\_bdc}) + (1 - p)T_{Rech\_manuelle})}$$

Pour atteindre le seuil de rentabilité, cet indicateur doit dépasser 1, ce qui induit de minimiser le temps de développement  $T_{Dev}$ . Cette durée est, de loin, la plus importante en ordre de grandeur, et va

### 3.3. DÉFINITION DU SYSTÈME DE MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

fortement influencer le nombre de recherches minimales à réaliser pour rentabiliser son implémentation. Comme cette formule du ROI n'est pas bornée, la rentabilité peut être atteinte après un nombre très important (qui tend vers l'infini) de requêtes  $n$ , tant que  $T_{Cap} + T_{Rech\_bdc}$  est inférieur à  $T_{Rech\_manuelle}$ , dont la pertinence sera à évaluer par les décideurs. De plus, pour accélérer l'atteinte de la rentabilité, il est également intéressant de « jouer » sur le paramètre  $p$ . Cela signifie que  $p$  doit tendre le plus possible vers 1, et donc qu'un maximum d'informations recherchées sont contenues dans la BDC. Il s'agit donc de trouver la structuration des connaissances qui sied le mieux à l'usage prévu. Dans notre cas, nous avons identifié le MM de capitalisation des processus pour cela. Enfin, avec cet indicateur de ROI, se pose la question de la limite. En effet, pour maximiser  $p$ , il faut que « tout » soit capitalisé pour être sûr de pouvoir y accéder en cas de besoin dans le futur, et deux limites apparaissent alors. La première est d'ordre physique, puisqu'il y aura un coût et une limite physique à stocker des masses de données qui seront difficiles à valoriser. La deuxième est d'ordre logique, puisqu'avec cette approche il existera un temps à partir duquel il sera plus long de rechercher les informations dans des BDC gigantesques plutôt que de les rechercher « normalement ». Finalement, cet indicateur aide à répondre rapidement à la question de l'analyse de la rentabilité d'un système de capitalisation des connaissances (orienté pour la recherche d'informations), bien qu'il existe des limites physique et théorique à son utilisation.

Pour cette proposition de définition du ROI de la capitalisation des connaissances, seuls les temps sont considérés pour quantifier le gain qu'un système de gestion des connaissances peut apporter. En pratique, des coûts supplémentaires comme l'achat et la maintenance d'un logiciel, l'achat de prestation pour supporter l'installation et la mise en place de l'outil pourraient également être considérés mais étant donné leur caractère non récurrent, nous faisons l'hypothèse que ces frais seront dilués par l'utilisation dans le temps de l'outil. Cela définit un indicateur plus simple, mais tout de même capable d'offrir une tendance sur la performance de la capitalisation des connaissances pour les recherches d'informations.

#### Taux de capitalisation

La notion de taux de capitalisation est associée au besoin de quantifier l'écart de capture des connaissances entre un état *as-is* et un état *to-be*. Pour cela, la capitalisation des connaissances, proposée à travers la complétion du MM proposé, structure la connaissance autour des informations sur le contexte QQQCOP de l'activité. Cette structuration repose sur l'identification des caractéristiques clés de l'activité, telles que définies dans les deux premières colonnes du tableau 3.4 ci-dessous. On y retrouve les éléments du QQQCOP, dont certains éléments sont redondants en fonction des différents points d'intérêt à capitaliser. C'est par exemple le cas du « Quoi ? » et du « Pourquoi ? ». Le premier sert à capturer en premier lieu l'objet de l'activité, c'est-à-dire « qu'est-ce qui est réalisé ? », c'est en quelque sorte le titre de l'activité qui pourrait être renseigné au centre du rectangle d'une modélisation IDEF0. Le « Quoi ? » fait référence aux différentes entrées et sorties de l'activité, sous toutes leurs formes, qui constituent les données les plus importantes à capitaliser dans une perspective de réutilisation. Ensuite, le « Pourquoi ? » sert à la capitalisation d'éléments utiles pour étudier le processus décisionnel et pour apporter de l'aide dans la prise de décision au concepteur. C'est pour cela que cette donnée est séparée en une composante de « justification », pour capitaliser le processus décisionnel qui a découlé sur cette activité, et en une composante d'« objectif(s) » qui explicite les enjeux autour de cette activité. C'est d'ailleurs ce dernier point qui sert à l'évaluation de l'efficacité

### 3.3. DÉFINITION DU SYSTÈME DE MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

présentée précédemment. Ensuite, le « Comment ? » est l'outil de capitalisation des ressources utilisées lors de la réalisation de l'activité, c'est donc un élément qui englobe une grande diversité d'outil d'aide à l'utilisateur comme les documents (qui eux-mêmes se décomposent en des rapports, des méthodes, des normes, etc...), les logiciels, les moyens physiques ou les modèles d'ingénierie. Le « Pourquoi ? » n'a pas fait l'objet d'une décomposition entre tous ces éléments étant donné leurs disparités d'utilisation au sein des différentes activités, ce qui aurait donné lieu à la capitalisation de nombreux « N/D » - pour Non Défini ou Non Disponible. Enfin, les informations moins complexes comme le « Qui ? », « Quand ? » et « Où ? » sont des catégories dont l'identification et la capture des informations sont simples car peu diversifié ou en faible quantité.

TABLE 3.4 – Données à capitaliser lors des activités pour constituer la base des connaissances

Capitalisation	Commentaire	Poids unitaire	Poids maximal
Qui ?	-	1	4
Quand ?	-	1	4
Quoi ?	Objet de l'act.	1	4
Quoi ?	Entrées de l'act.	5	20
Quoi ?	Sorties de l'act.	5	20
Comment ?	Méthodes de l'act.	4	16
Où ?	-	1	4
Pourquoi ?	Justification de réalisation de l'act.	1	4
Pourquoi ?	Objectif(s) de l'act.	1	4
<b>Total</b>	-	-	<b>80</b>

Le tableau 3.4 fait mention de poids unitaires associés à chaque catégorie à capitaliser. Ces poids correspondent à la richesse et à la diversité des éléments à capitaliser de chaque catégorie, et ont été fixés arbitrairement en fonction de l'importance supposée des éléments du contexte selon notre contexte d'étude. Seuls les poids de certains « Quoi ? » et du « Comment ? » sont augmentés pour caractériser la diversité et la complexité des différents éléments à capitaliser dans ces catégories, définis respectivement à "5" et "4". Ces poids marquent l'importance des données capitalisées dans la perspective d'une réutilisation future et/ou la facilité de capitalisation, d'où le fait de retrouver les informations du « Qui ? », du « Quand ? » et du « Où ? » avec un poids de "1" en raison de leur enregistrement simple et de leur intérêt limité dans la réutilisation des connaissances - bien qu'ils apportent des informations sur l'historique, qui sont importantes pour analyser les processus décisionnels.

À chaque poids est associé un niveau de capitalisation, mesuré ou estimé lors de l'activité. Pour cela, une échelle de Likert est proposée, dans le tableau 3.5, pour que la capitalisation de l'activité réalisée soit évaluée par l'utilisateur. Cette échelle à cinq niveaux passe d'un extrême, pas de capitalisation des éléments clés, à un autre, tous les éléments sont capitalisés.

### 3.3. DÉFINITION DU SYSTÈME DE MESURE DE LA PERFORMANCE DÉVELOPPÉE

---

TABLE 3.5 – Échelle d'évaluation du niveau de capitalisation de chaque composant QQQCOP du contexte

Niveau de capitalisation	Très incomplet	Incomplet	Correct	Complet	Très complet
Poids associé	0	1	2	3	4

L'échelle de Likert à 5 niveaux, couplée aux poids unitaires présentés dans le tableau 3.4, conduit à un poids maximal de chaque élément à capturer, renseigné dans ce même tableau. La somme de ces poids est évaluée à 80, d'où l'expression d'un KPI du taux de capitalisation mis à l'échelle entre 0 et 1, tel qu'il représente la somme du nombre d'éléments capitalisés pondérés sur le nombre total d'éléments capitalisables pondérés :

$$\text{taux\_capitalisation} = \frac{1}{80} \sum \text{Poids unitaire} \times \text{Niveau de capitalisation}$$

Ce taux, borné sur l'intervalle  $[0; 1]$ , renseigne sur le degré d'informations qui sont capitalisées au regard des informations qui sont capitalisables dans le modèle de formalisation utilisé. Dans notre cas, il s'agit du MM défini dans la section 3.2, construit pour capitaliser le contexte QQQCOP. L'indicateur du taux de capitalisation peut être adapté en fonction des modèles formels de capitalisation utilisés, pour refléter les attentes de capitalisation de différents processus, produits ou contextes. Il a été ici défini pour répondre à nos objectifs de traçabilité des processus et de réutilisation des connaissances.

## 3.4 Bilan de la proposition

Nous avons présenté dans la section 3.1 une architecture de système KBE. Elle s'articule autour de plusieurs composants, dont les outils métier, la BDC et les modèles de connaissance. La définition d'une structure d'implémentation de KBS constitue notre première proposition, avec en particulier le détail de l'organisation d'un système KBE dans le PDP. La section 3.2 complète la définition du système KBE avec la présentation d'un modèle formel de capitalisation des connaissances. Ces deux propositions répondent au besoin de formaliser la structure d'un système KBE au sein d'un PDP, afin de faciliter leur implémentation et utilisation dans des environnements industriels, et pour répondre aux cas d'usages qu'ils ont identifiés.

Le deuxième acte de la proposition concerne l'évaluation des gains apportés par l'utilisation des systèmes KBE. Cela inclut la définition des indicateurs autour de l'intégration de ces outils dans le PDP, pour évaluer le potentiel gain qui pourra être obtenu au regard de la complexité de la solution. Cette notion n'était pas traitée dans la littérature scientifique qui porte sur la thématique du KBE, ce qui apporte un premier élément de réponse. L'évaluation de la performance d'une activité ou d'un processus n'est pas non plus considérée dans la littérature, dans un contexte KBE, même s'il existe une base de travaux théoriques sur la performance des processus. Notre proposition se base sur ces définitions d'efficacité et d'efficience pour apporter une nouvelle définition de la performance, qui est générique à n'importe quel processus, mais également adaptée à l'évaluation d'activités qui utilisent des systèmes KBE. Enfin, le dernier volet de la proposition sur le système de mesure concerne la mesure de la performance de la capitalisation des connaissances. D'après notre analyse de l'état de l'art, il n'existe pas d'indicateur capable de quantifier un ROI dans les activités de capitalisation et de réutilisation des connaissances, ce que notre proposition vient compléter.

Finalement, à l'issue du chapitre 3, nous avons proposé une architecture de système KBE qui s'intègre dans le PDP pour répondre à l'usage identifié dans le chapitre 1. Pour rappel, il s'agit de réutiliser des connaissances pour améliorer la performance, en temps et en coûts, des activités de pré-dimensionnement de lignes et d'arbres de transmission. Nous avons également proposé le moyen de formaliser les connaissances pour répondre à ce cas d'usage, avec la définition d'un MM de capitalisation du contexte QQQCOP. Et enfin, le système de mesure est développé pour vérifier l'influence de l'utilisation des systèmes KBE sur les critères de performance.

Dans la suite de notre démarche de structuration des résultats de ce travail dans le MM de *benchmark*, nous pouvons intégrer les éléments de notre proposition dans le modèle général de la figure 3.8. Ainsi, trois éléments sont ajoutés aux collections expérimentales. Tout d'abord la proposition d'architecture KBE qui fait le lien entre le processus de capitalisation et le processus métier. Ensuite, la proposition de MM de capitalisation du contexte QQQCOP des activités et processus métier. Enfin, le système de mesure de la performance des activités métier, du processus de capitalisation et des outils métier. Ce système de mesure est, de plus, applicable aux processus qui intègrent des KBS.

### 3.4. BILAN DE LA PROPOSITION

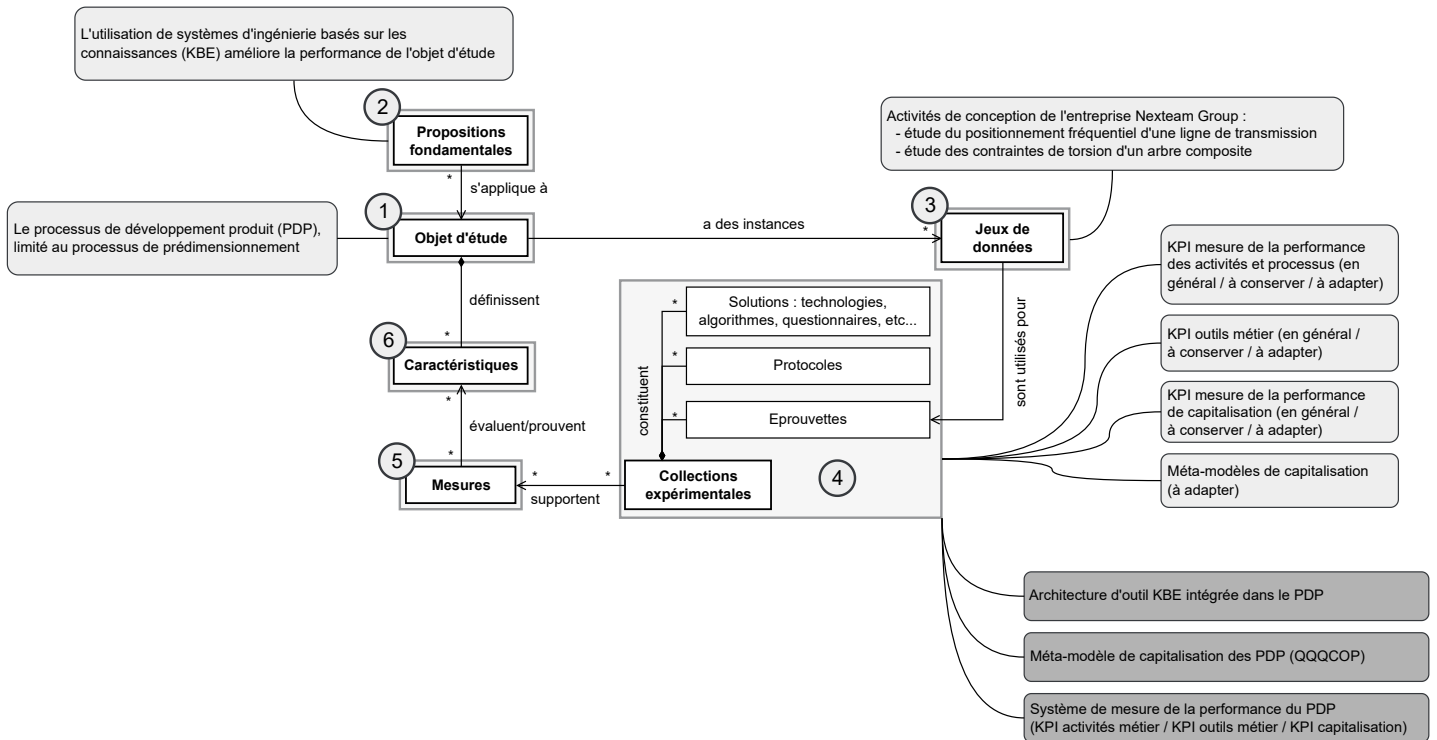


FIGURE 3.8 – Méta-modèle de benchmark à l'issue du chapitre 3

L'ensemble des éléments qui constituent la proposition scientifique de ces travaux de thèse sont maintenant à valider pour démontrer leur pertinence. Le prochain chapitre s'attache à démontrer la capacité du système de mesure proposé à évaluer les gains apportés par le système KBE intégré au PDP de l'entreprise Nexteam Group.

## Chapitre 4

# Implémentation et validation de la proposition scientifique

### Contenu

---

<b>4.1</b>	<b>Implémentation de l'application KANO</b>	<b>129</b>
4.1.1	Présentation générale	129
4.1.2	Modélisation de la base de connaissances	131
4.1.3	Activité KBE pour le calcul des contraintes en torsion d'un arbre composite	133
4.1.4	Activité KBE pour le calcul modes propres d'une ligne de transmission de puissance	135
4.1.5	Activité KBE pour la manipulation de la base de connaissances	138
<b>4.2</b>	<b>Définition du protocole de validation</b>	<b>140</b>
4.2.1	Les outils de conception	143
4.2.2	Définition du cahier des charges	144
4.2.3	Données à mesurer	148
4.2.4	Relevé des mesures et questionnaire	150
<b>4.3</b>	<b>Mise en œuvre sur les activités de conception</b>	<b>153</b>
4.3.1	Mesure et estimation de la performance de la capitalisation	153
4.3.2	Mesure de la performance des activités du processus métier de prédimensionnement	156
4.3.3	Extension des résultats à l'échelle du processus de prédimensionnement	161
4.3.4	Mesure du ROI et de la complexité d'intégration dans le processus métier des outils KBE	166
4.3.5	Estimation du ROI du processus de capitalisation	170
4.3.6	Conclusion sur le système de mesure de la performance	172
<b>4.4</b>	<b>Conclusion de l'application</b>	<b>174</b>

---

---

Après avoir présenté les propositions scientifiques apportées par ces travaux de thèse au précédent chapitre, ce quatrième et dernier chapitre va les mettre en œuvre sur des cas applicatifs concrets, basés sur les projets industriels de l'entreprise Nexteam Group, pour démontrer et valider les apports scientifiques de ces travaux. Le chapitre est organisé d'après les quatre sections suivantes :

- La première section détaille l'implémentation du système KBE, le logiciel KANO, développé pour soutenir les concepteurs de l'entreprise Nexteam Group pour le prédimensionnement de lignes de transmission et d'arbres de transmission composite. Ce logiciel intègre deux outils métier, pour le calcul des fréquences d'une ligne de transmission et le calcul des contraintes de torsion d'un arbre composite. Il est aussi composé d'une BDC, dont le rôle est de capitaliser les données métier, ainsi que d'une IHM et d'un outil d'interaction avec la BDC.
- La deuxième section introduit le protocole de mesure qui est utilisé pour les expérimentations réalisées par les concepteurs. Ce protocole vise à définir un cadre structuré pour mesurer les différentes données nécessaires à la définition des KPI du système de mesure proposé.
- La troisième section présente et analyse les mesures réalisées par les concepteurs sur les différents niveaux du PDP. La première sous-section concerne l'évaluation de la performance du processus de capitalisation, avec l'étude du taux de capitalisation réalisé lors de chaque activité. Viennent ensuite les sous-sections qui étudient la performance des activités métier puis du processus métier dans son ensemble. Puis la sous-section suivante traite l'étude de la performance des outils métier avec les indicateurs de calcul du ROI et de complexité d'intégration. Enfin, la dernière sous-section évalue le ROI du processus de capitalisation.
- Enfin, la quatrième et dernière section conclut sur les apports de l'application et sur la mise en œuvre du système de mesure de la performance des systèmes KBE.

### 4.1 Implémentation de l'application KANO

#### 4.1.1 Présentation générale

Cette section présente le développement et l'architecture de l'application métier KANO développée dans le cadre de ces travaux de thèse. L'objectif de cette application est d'apporter des outils aux concepteurs pour les deux principales tâches identifiées précédemment pour répondre à la problématique d'améliorer la performance du processus de prédimensionnement de lignes et d'arbres de transmission.

L'application KANO développée regroupe les deux activités métier, pour le calcul des contraintes et des fréquences, intègre une BDC qui est reliée aux deux outils métier, ainsi qu'une IHM pour que n'importe quel utilisateur interagisse avec ces trois éléments. Le composant sur la gestion et la recherche des connaissances est relié aux deux activités métier de calcul, et permet l'accès aux connaissances de la BDC grâce à des requêtes SQL. C'est par l'utilisation de ces requêtes que l'utilisateur récupère les connaissances capitalisées dans le MM, soit pour rechercher des informations, soit pour réexploiter certaines des connaissances extraites lors de futures activités.

Le logiciel KANO a été développé via le langage de développement informatique Python en utilisant les bibliothèques suivantes :

- Dash et Plotly : pour développer l'IHM entre les différentes activités métier et les concepteurs.
- SQLite : pour implémenter le MM de capitalisation.
- PyNastran : pour interfacier les outils développés avec les logiciels commerciaux d'ingénierie.
- Gmsh et Numpy : pour développer les activités métier.

Le choix d'une BDD en SQLite pour implémenter la BDC et le MM de capitalisation est motivé par plusieurs facteurs. Tout d'abord, le langage SQL est retenu pour son implémentation connue et mature au sein d'environnements industriels. Si jamais le logiciel doit passer d'un état de « preuve de concept » à un niveau plus opérationnel, alors il est préférable d'avoir utilisé une technologie connue par une majorité de développeurs, et ce afin de trouver du personnel compétent pour mettre à jour et maintenir le code existant. C'est principalement pour cette raison que le choix de SQL a été préféré aux ontologies pour implémenter le MM, les ontologies présentant des difficultés à passer de l'environnement académique à des implémentations en environnement industriel. Une autre raison de favoriser SQL est la variété de systèmes de gestion de BDD : SQLite, MySQL, PostgreSQL ou encore MariaDB. Tous présentent des avantages et des inconvénients en fonction des caractéristiques de l'environnement dans lequel elles vont être implantées. Dans notre contexte d'étude, qui correspond à un environnement industriel aéronautique dans lequel des produits sont « ingénierés », l'application développée constitue une « preuve de concept » pour appliquer les propositions de recherche de ces travaux de recherche et valider les résultats. Sur la base de ce constat, la solution SQLite est retenue pour sa capacité à s'intégrer dans des applications simples et portables, comme notre « preuve de concept », un stockage centralisé et simplifié et enfin la facilité d'implémenter de nouvelles fonctionnalités. De plus, les absences de gros volumes de données et de connexions simultanées en font également des arguments supplémentaires. Dans le cas où cette « preuve de concept » s'intègre bien dans le processus industriel de conception, l'application pourra ensuite être améliorée ou redéveloppée par des professionnels avec

## 4.1. IMPLÉMENTATION DE L'APPLICATION KANO

---

des outils complètement adaptés au besoin. Le logiciel est structuré autour de trois blocs tels que présentés sur la figure 4.1. Ce type d'architecture d'application est typique pour les développements réalisés avec les bibliothèques Dash et Plotly.

- **Les fichiers de la structure de l'application :** Ce groupe est formé des fichiers `app.py`, `callbacks.py` et `context_manager.py`. Le premier sert à lancer l'application KANO, le deuxième permet de gérer l'ensemble des interactions entre le logiciel et l'utilisateur, en créant les liens entre les boutons et les actions à réaliser, et enfin le troisième construit l'IHM qui sert à capitaliser le contexte de l'activité.
- **Les fichiers de l'affichage des activités :** Ce groupe rassemble les fichiers de la définition graphique de chaque activité implémentée (`activity1.py` pour le calcul des contraintes de torsion et `activity2.py` pour le calcul des modes propres) dans le logiciel, c'est-à-dire la position des boutons, des champs à renseigner ou encore des graphiques. Le fichier de la construction de l'IHM, qui aide l'utilisateur de dialoguer avec la BDC (`database.py`, non représenté sur la figure 4.1), est également à inclure dans ce groupe. De plus, il est possible qu'un même outil donne lieu à plusieurs activités métier, ce qui n'est pas le cas sur notre cas d'étude où chaque activité fait appel à son propre outil métier.
- **Les fichiers des outils métier :** Ce groupe intègre l'ensemble des codes des outils métier intégrés dans le logiciel. On retrouve par exemple le fichier `build_composite_shaft.py` pour construire les modèles EF d'arbre de transmission en composite, dont le détail sera donné dans la sous-section suivante. Les fichiers `shafts.py`, `couplings.py`, `supports.py`, `interfaces.py`, `nastran_cards_builder.py` et `model_sol103.py` servent pour le calcul des fréquences d'une ligne de transmission, et seront également détaillés dans les prochaines sous-sections. Puis, le fichier `DB_management.py` pilote toutes les interactions entre la BDD et les outils métier, afin de capitaliser l'ensemble des données utiles. Enfin, le fichier `run_nastran.py` communique avec le logiciel de calcul Nastran pour réaliser les calculs des modèles EF générés par les outils métier.

Le développement de l'IHM est la dernière brique nécessaire aux utilisateurs pour s'interfacer avec les outils métier sans connaissances préalables en programmation, ces derniers étant implémentés avec le langage informatique Python. La création de l'IHM est estimée à 120 heures passées par une personne experte en programmation et avancée en développement d'application et 35 heures pour une autre personne avancée en programmation et novice en développement d'application. Le développement d'une application avait été tenté au préalable par une personne novice, mais n'avait pas permis d'aboutir à un résultat satisfaisant après plus de 300 heures de développement. Ce dernier point sera négligé pour les calculs de performance du fait de caractère « exploratoire » du développement. La mesure des temps de développement sera à prendre en considération pour étudier le ROI et la performance du logiciel développé.

## 4.1. IMPLÉMENTATION DE L'APPLICATION KANO

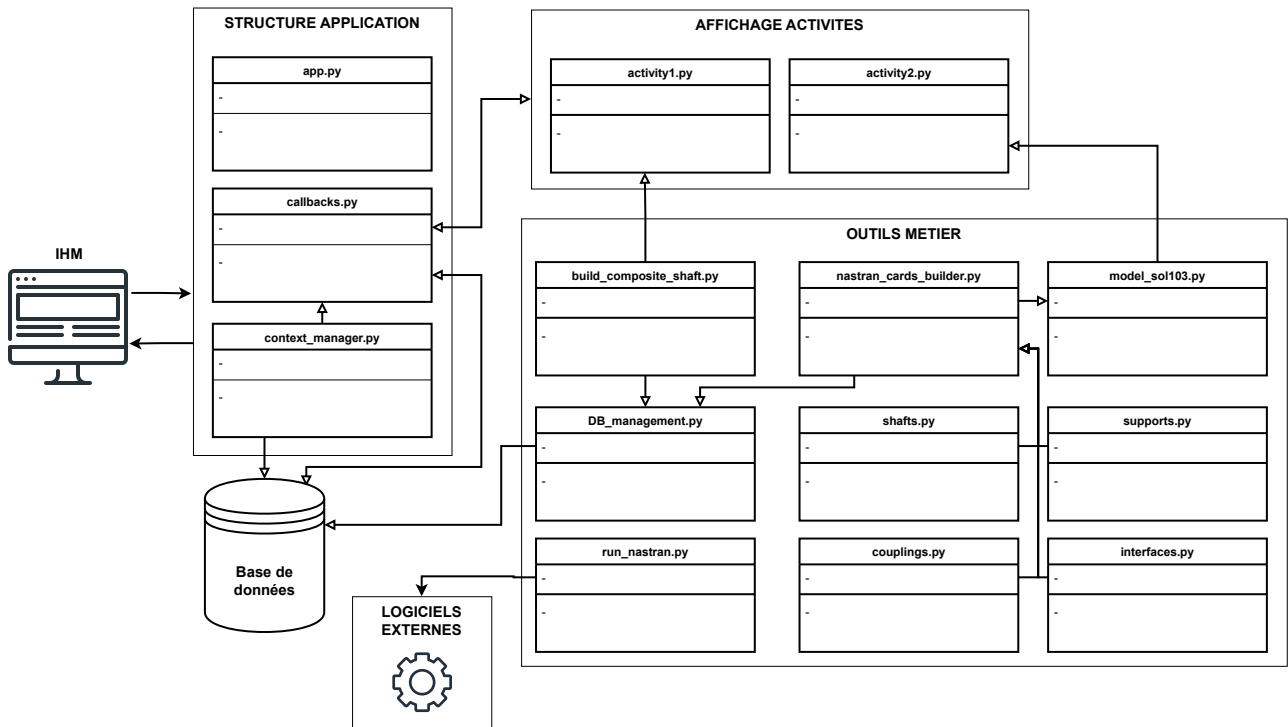


FIGURE 4.1 – Diagramme de classe de l'application KANO

### 4.1.2 Modélisation de la base de connaissances

Les deux composants clés d'une application KBE sont les outils métier et la BDC. Cette sous-section s'attache à présenter l'implémentation de la BDD relationnelle qui constitue la BDC de l'application métier KANO, à travers le MM proposé en figure 3.4.

L'implémentation du MM à travers une BDD relationnelle est visible sur la figure 4.2 suivante. Différentes tables sont définies pour capitaliser les éléments clés du QQQCOP comme les tables « Project », « Processus » ou encore « Activity ». Dans cette dernière, les attributs « real\_start\_date », « real\_end\_date » et « activity\_justification » permettent de capturer les éléments importants de l'activité sur sa durée et les causes de réalisation. La table « ActivityInputOutput » permet quant à elle d'identifier les différents modèles, paramètres ou autres comme étant des données d'entrée ou de sortie de l'activité à travers les attributs « parameter\_value », « input\_output\_description », « id\_parameter » et « id\_model ». La modélisation de la structure du MM proposé est légèrement simplifiée pour cette « preuve de concept » pour simplifier le développement : les éléments sont uniquement caractérisés comme des entrées ou des sorties, et il ne peut y avoir que des paramètres ou des modèles, ce qui correspond aux principaux éléments des composants MMG. Enfin, la table « Model » fait la synthèse de l'ensemble des modèles d'ingénierie que les concepteurs ont à disposition pour réaliser les activités durant le PDP. Les modèles pour l'activité de calcul des contraintes ainsi que pour le calcul des fréquences se retrouvent ainsi liés à cette table « maître ».

## 4.1. IMPLÉMENTATION DE L'APPLICATION KANO

Le temps de développement de la BDD, dans l'application KANO, correspond aux temps de développement de la capitalisation de chaque activité métier. Les durées de développement de la capitalisation de chaque activité seront spécifiquement détaillées dans les sous-sections suivantes, dédiées à leur présentation.

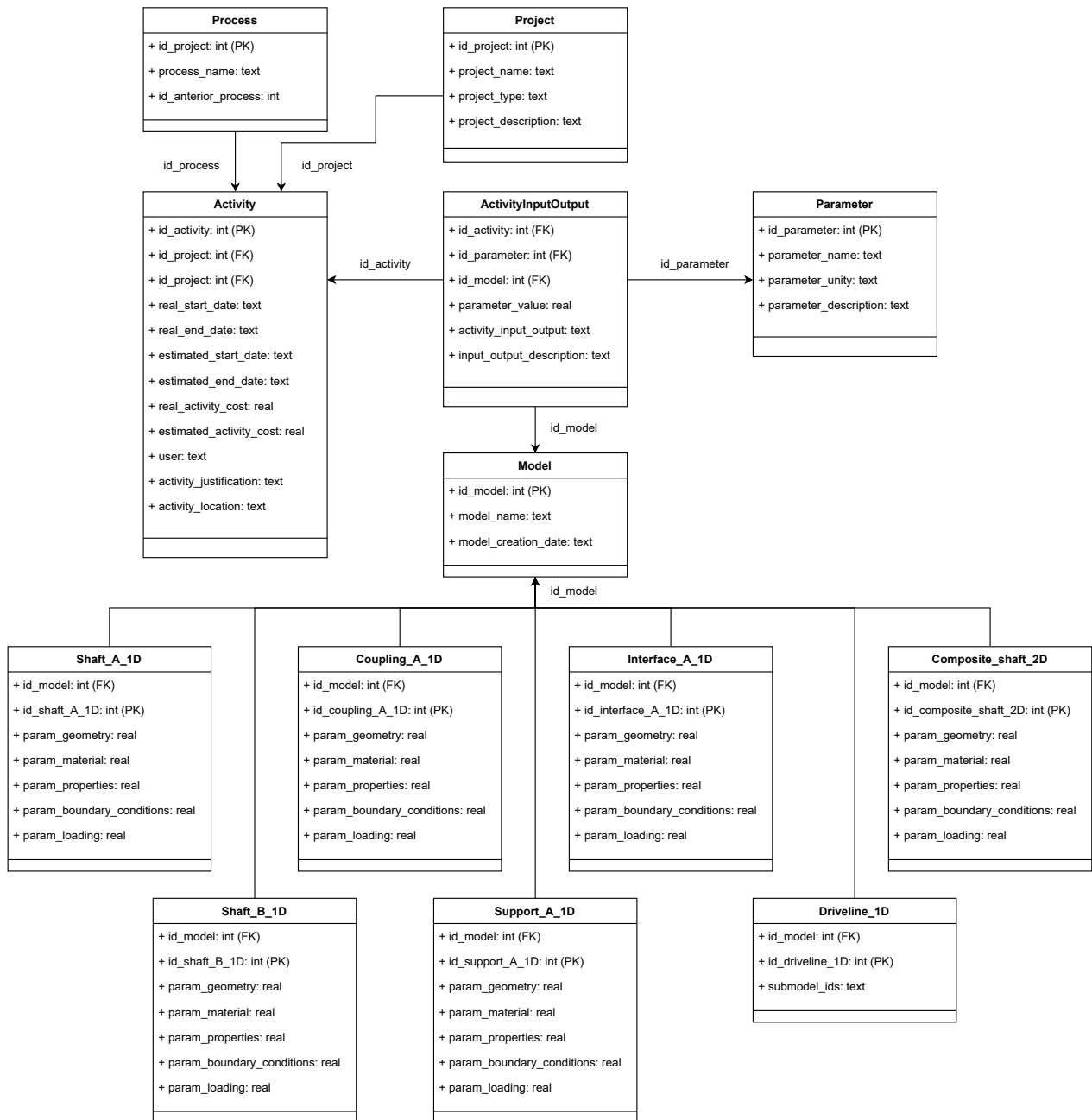


FIGURE 4.2 – Structure de la base de données du logiciel KANO

### 4.1.3 Activité KBE pour le calcul des contraintes en torsion d'un arbre composite

La génération d'un modèle paramétrique se fait à travers une classe qui contient l'ensemble des attributs (les caractéristiques) et des méthodes. Cette classe **Composite\_Shaft** est détaillée sur la figure 4.3. En premier lieu, elle contient les informations à capitaliser dans le MM de trace, donc les QQQCOP, ce qui inclut par exemple les attributs `activity_justification`, `activity_user`, `process_name` ou encore `project_name`. L'ensemble des données concernant les caractéristiques de l'arbre à modéliser sont également intégrées dans la classe dans les attributs `*_parameters`. Enfin, l'attribut `solution` permet d'envisager l'extension de la génération de modèles pour le calcul de contraintes à d'autres types de calculs. Par exemple, les calculs de modes propres et de flambage en torsion utilisent le même modèle EF en donnée d'entrée, avec quelques adaptations des paramètres du fichier du calcul généré. Cet avantage permet de mutualiser le temps de développement d'un outil pour plusieurs activités différentes, ce qui représente un levier pour améliorer la performance développée finale : un seul développement de modèle permet de réaliser plusieurs activités différentes grâce à de légères modifications. Dans le calcul du ROI de Van der Velden [22], cela se traduit par une augmentation significative du nombre d'utilisations  $n$  qui est induit par l'utilisation de l'outil dans de multiples activités. Ce cas n'est pas traité dans ces travaux mais l'exemple donné démontre le potentiel de développement d'outils réutilisables sur de multiples activités différentes.

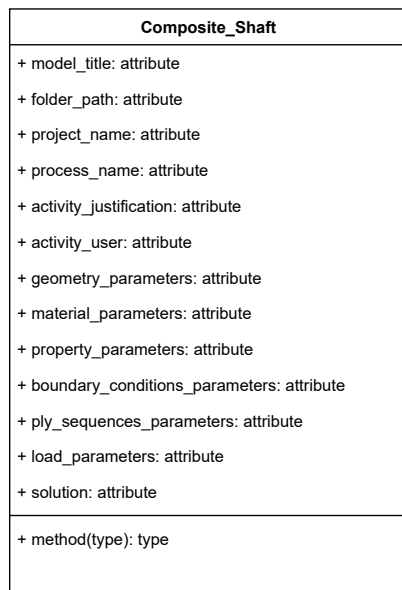


FIGURE 4.3 – Représentation de la classe utilisée pour le calcul des contraintes d'un arbre de transmission

Cet outil métier a pour objectif de générer un fichier de calcul EF de l'arbre composite « \*.bdf », de réaliser le calcul puis de récupérer et post-traiter les résultats pour en extraire les informations qui vont guider le concepteur sur les choix techniques de conception à réaliser. Ce processus est représenté sur le diagramme IDEF0 simplifié de la figure 4.4. Pour réaliser cela, l'outil utilise le langage informatique

## 4.1. IMPLÉMENTATION DE L'APPLICATION KANO

Python avec les bibliothèques Gmsh, Numpy et PyNastran. Gmsh est utilisé pour générer les différents maillages de l'arbre, Numpy aide à manipuler les tableaux de données et enfin PyNastran sert à écrire les fichiers de calcul, qui servent de données d'entrée au logiciel Nastran, et à lire les fichiers de résultats retournés par le logiciel Nastran.

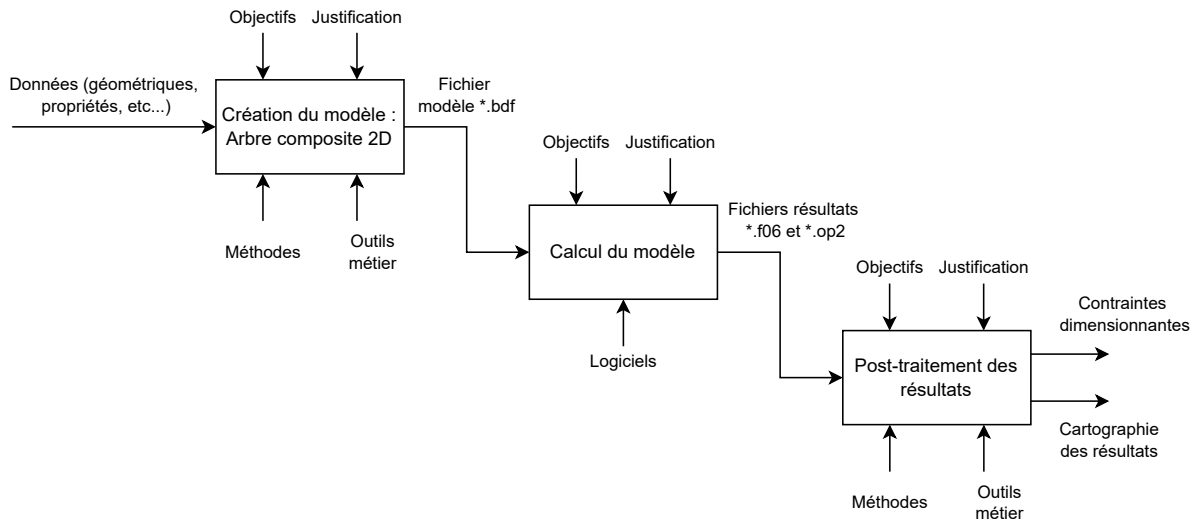


FIGURE 4.4 – Processus détaillé du calcul des contraintes de torsion d'un arbre composite

L'outil métier implémenté dans le logiciel KANO reçoit en entrée les paramètres géométriques et les propriétés des matériaux (sur plus de 30 paramètres) ce qui permet de modéliser un large spectre de l'espace des solutions des arbres composite. Un exemple de différentes définitions d'arbres que l'outil est capable de générer est donné sur la figure 4.5. La géométrie de l'arbre et de la bride, ainsi que les définitions des trous habités et non habités sont paramétrables pour offrir un maximum de libertés au concepteur. Le maillage, qui n'est pas visible sur cette figure en raison de sa petite dimension, est également un paramètre réglable par le concepteur pour obtenir plus ou moins de précision sur certaines zones à étudier.

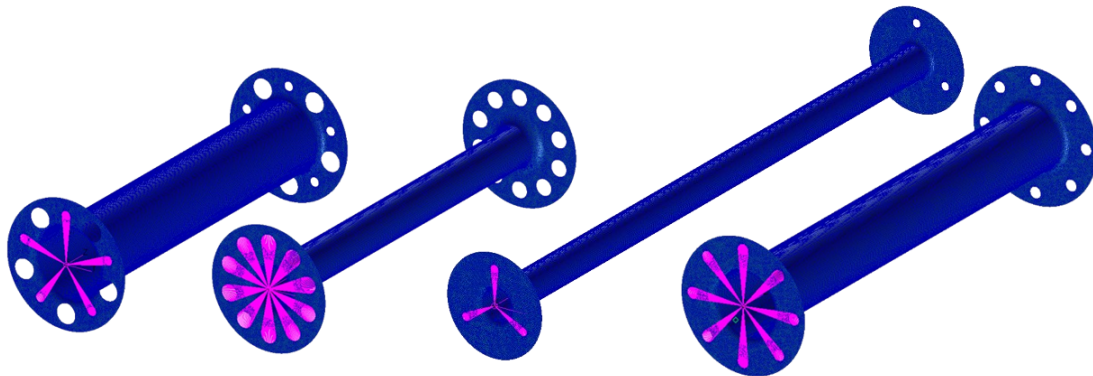


FIGURE 4.5 – Exemple de différentes configurations d'arbres de transmission en composite générées par les outils métier intégrés au logiciel KANO

Enfin, le développement de l'outil KANO a nécessité des ressources qu'il est important de quantifier pour pouvoir estimer la performance que cet outil apporte durant les phases de développement. Le principal coût, au sens du « coût-durée », est associé aux différents temps de développement du logiciel, dont les principaux postes de dépenses sont :

- **Le développement de l'outil d'ingénierie (métier)** : représente un temps important pour le développement d'un outil conforme aux bonnes pratiques de conception et pour la correction des bugs de développement. Le temps d'implémentation de l'outil est estimé à 45 heures, sans cependant compter les heures passées à réaliser quelques prototypes précédents qui n'ont pas atteint le niveau de maturité souhaité. Le temps passé sur ces précédents outils sera négligé dans les calculs de performance développée.
- **Le développement de la capitalisation** : est le temps passé à développer les connexions entre l'outil métier et la BDC. La capitalisation récupère l'ensemble des données QQQCOP, principalement axées sur les paramètres d'entrée du modèle paramétrique. Ce temps est estimé à 10 heures.

L'application KANO contient une page dédiée à cette activité de calcul des contraintes de torsion des arbres composite, construite en deux parties. La première, visible avec la figure C.3, est dédiée au renseignement de l'ensemble des paramètres du modèle. Il existe également un onglet, à étendre, pour renseigner les éléments du contexte de réalisation de cette activité, pour le besoin de capitaliser les QQQCOP, voir figure C.2. Puis, la deuxième partie, voir figure C.4, affiche les principaux résultats utiles au concepteur à l'issue de la génération du modèle et du calcul, tel que présenté sur le processus figure 4.4.

### 4.1.4 Activité KBE pour le calcul modes propres d'une ligne de transmission de puissance

La combinaison des différents composants en série, qui forment la ligne de transmission, constitue la principale source de difficulté dans la modélisation du comportement dynamique de l'ensemble. En effet, le résultat final est dépendant de l'ensemble des composants qui s'inter-influencent. Cela supprime alors l'approche analytique qui, est difficile à mettre en œuvre lorsqu'il existe autant d'interdépendances et de combinaisons possibles entre les composants, au profit d'une approche par EF modulaire. Cette dernière présente l'avantage de pouvoir être intégralement personnalisable et au plus proche de la conception. Une approche paramétrique de la construction des modèles par EF est favorisée pour permettre la réutilisation des connaissances de la définition de chaque composant, ainsi que des règles de modélisation des lignes de transmission. La connaissance est écrite « en dur » dans le programme ce qui garantit qu'elle est et reste la propriété de l'industriel, en plus d'être utilisable par des concepteurs avec des expériences différentes. Un objectif de l'approche paramétrique automatisée est de pouvoir fournir un résultat rapide au concepteur, pour une architecture qu'il imagine compatible avec le CdCF. Comme chaque étude de ligne de transmission peut présenter une structure (enchaînement de composants) différente, cela oblige à modéliser la ligne exacte et empêche de réutiliser de précédents résultats à travers un modèle générique du fait du grand nombre de différences. De ce fait, réutiliser les connaissances par des approches de ML (*Machine Learning*) ou d'IA, qui nécessitent des structures de données d'entrée fixes, ne sont pas particulièrement adaptées à ce type de modélisation

## 4.1. IMPLÉMENTATION DE L'APPLICATION KANO

modulaire. L'approche paramétrique a donc été préférée car la modélisation modulaire en série était pertinente pour ce cas applicatif : tous les composants de la ligne de transmission se succèdent pour assurer la transmission du couple entre l'organe moteur et l'organe récepteur. Le processus de définition du modèle de ligne de transmission, à partir de l'assemblage des différents composants et jusqu'à l'obtention des fréquences, est représenté sur le diagramme IDEF0 simplifié en figure 4.6.

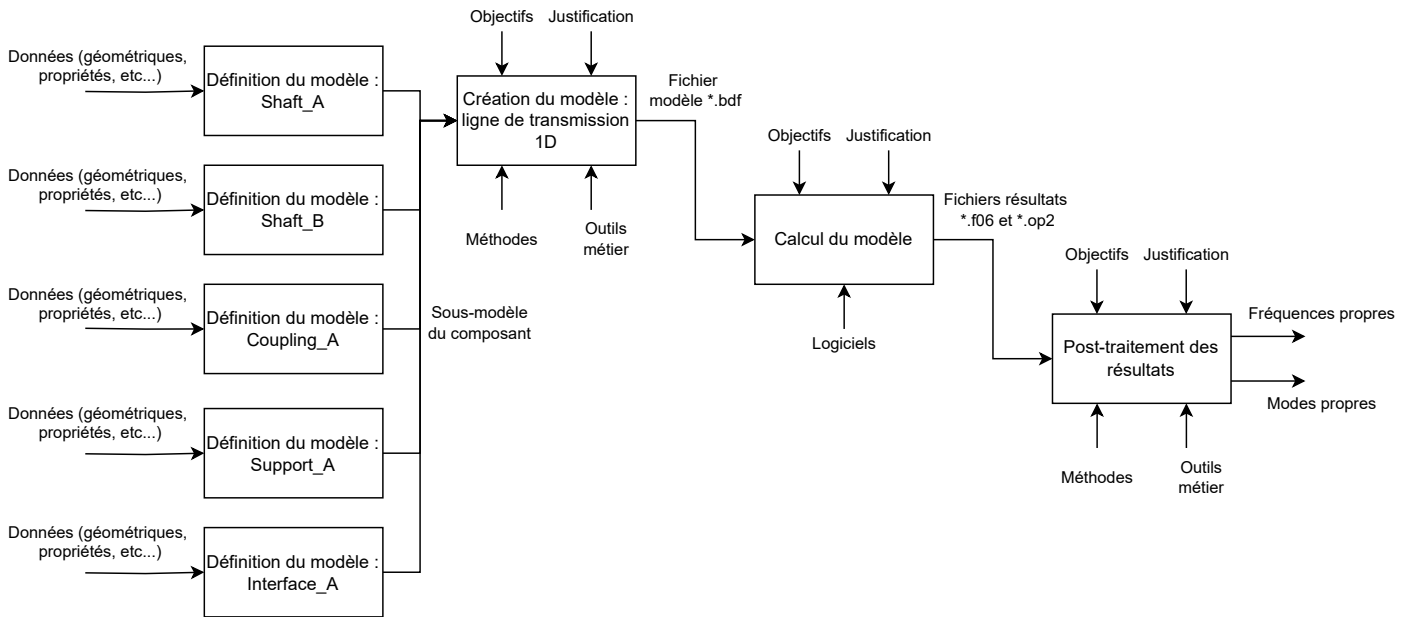


FIGURE 4.6 – Processus détaillé du calcul des fréquences d'une ligne de transmission

Chaque composant possède sa modélisation paramétrique par EF 1D, représentée par une classe de la figure 4.7. Les cinq composants **Shaft\_A**, **Shaft\_B**, **Coupling\_A**, **Support\_A** et **Interface\_A** peuvent s'assembler dans la classe **Nastran\_Card\_Builder** dont le rôle est de générer le modèle de la ligne de transmission par la combinaison des différents composants. Enfin, la classe **Model\_SOL103** sert à générer le fichier de calcul qui est la donnée d'entrée du logiciel de calcul Nastran. Cette figure montre la dimension extensible du logiciel KANO, puisqu'il est possible de rajouter autant de composants que souhaités pour venir enrichir la définition des lignes de transmission. Par exemple, deux définitions d'arbres de transmission, **Shaft\_A** et **Shaft\_B**, sont utilisées pour définir des arbres avec des propriétés isotropes, pour des matériaux généralement métalliques, ou orthotropes, plutôt pour définir les propriétés de l'empilement du matériau composite. L'outil est alors évolutif avec l'ajout de composants, avec de nouvelles caractéristiques, à mesure que de nouveaux besoins apparaissent avec de nouveaux CdCF. La figure 4.7 présente également la représentation par EF 1D paramétrique de chaque composant, représentés par des ensembles de nœuds (les points) et d'éléments (les rectangles).

L'assemblage en série des différents composants, présentés en figure 4.7, permet de définir des lignes de transmission telles que celle présentée sur la figure 4.8. Un arbre de transmission (métallique) **Shaft\_A** est représenté en gris, un arbre de transmission (composite) **Shaft\_B** en vert, les accouplements flexibles **Coupling\_A** en bleu, les supports **Support\_A** en rouge et enfin les pièces

#### 4.1. IMPLÉMENTATION DE L'APPLICATION KANO

d'interface **Interface\_A** en orange. La figure 4.7 représente par exemple une configuration montée de test de deux arbres en série montés sur trois paliers sur un banc d'essai. Cette structure graphique a été reprise et intégrée dans le logiciel KANO pour faciliter la génération graphique des modèles pour les concepteurs, chaque composant ayant ses propres caractéristiques géométriques, des propriétés matériaux ainsi que des conditions limites.

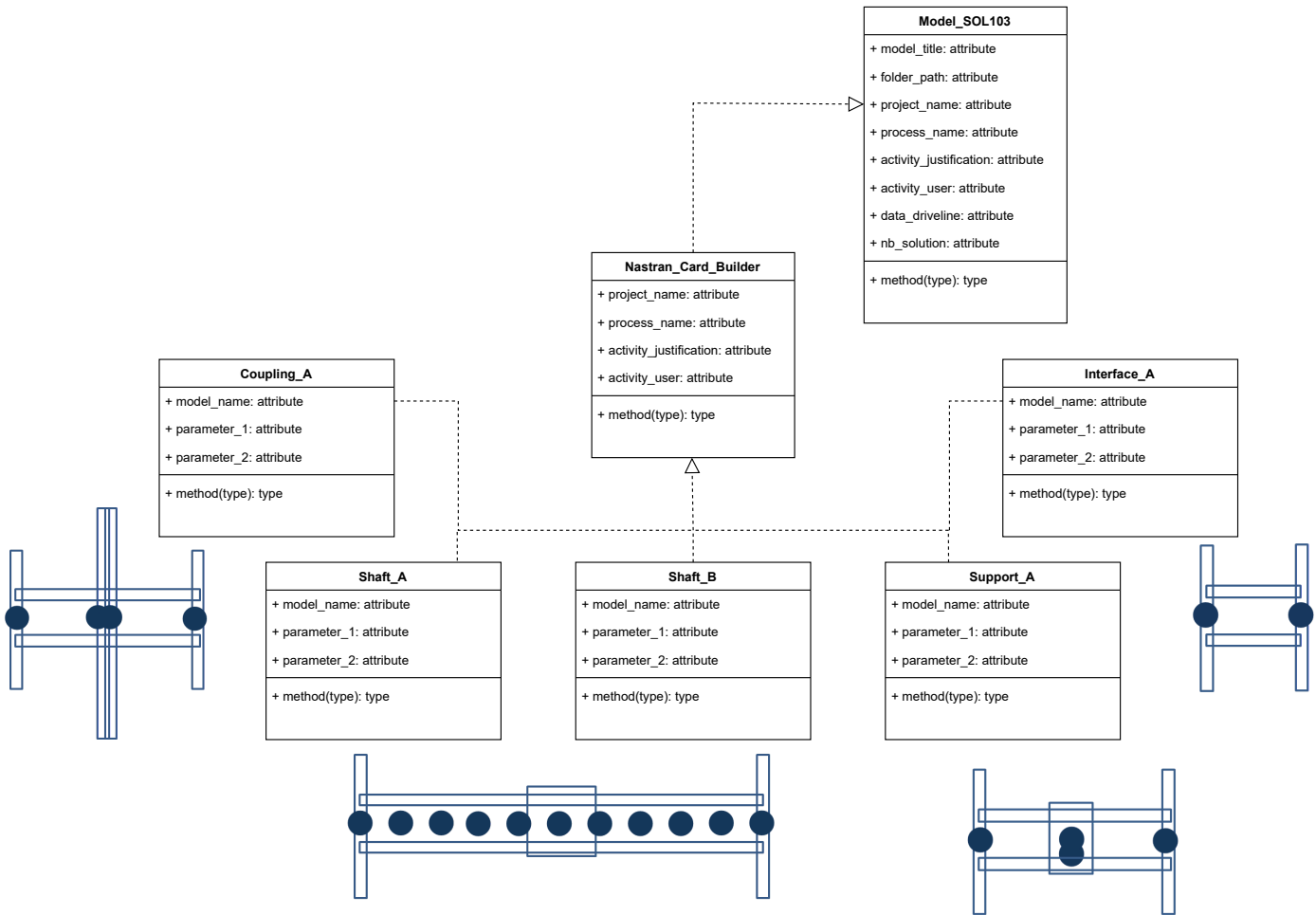


FIGURE 4.7 – Représentation des classes utilisées pour le calcul des fréquences d'une ligne de transmission

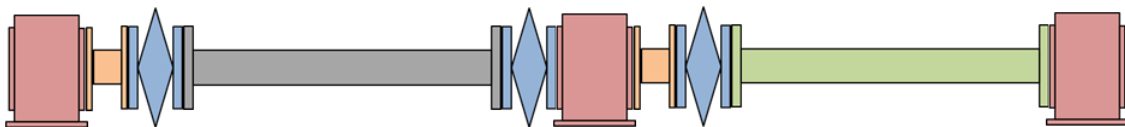


FIGURE 4.8 – Exemple d'une chaîne de transmission

Tout comme pour l'activité de calcul des contraintes de l'arbre, il est nécessaire de quantifier les ressources consommées pour développer l'outil. L'accent est principalement mis sur les temps de développement. Les principaux postes de dépenses sont les suivants :

- **Le développement de l'outil d'ingénierie** : constitue le cœur du développement puisque cela représente la connaissance propre de l'industriel qui est transformée en un outil d'ingénierie. Cette étape représente environ 35 heures de travail réalisées par une personne. À cela peuvent s'ajouter quelques heures de mises au point liées à la correction des différentes erreurs et bugs trouvés lors de l'utilisation, mais elles seront comptées comme négligeables dans ces travaux.
- **Le développement de la capitalisation** : représente la deuxième brique essentielle à la construction d'un système KBE. La définition de tous les liens, les données et les informations à capitaliser est une étape qui a nécessité environ 10 heures de travail supplémentaires pour une personne.

La page dédiée à cette activité de calcul des modes propres s'articule autour d'un graphique pour l'encapsulation en série des cinq composants définis de la figure 4.7, de façon à construire la ligne de transmission à étudier. La ligne de transmission donnée en exemple sur la figure 4.8 est modélisée sur le logiciel en figure C.6. L'IHM, qui est utilisée pour réaliser la modélisation, est visible en annexe sur la figure C.5. La figure C.6 illustre les résultats obtenus pour une ligne de transmission, sous la forme d'un tableau des fréquences et d'une identification du type de mode propre associé. Ce tableau présente les résultats des modes propres, dont la fréquence et le type de mode, pour que les concepteurs puissent analyser spécifiquement le positionnement des modes propres de flexion, car ce sont en général les plus contraignants dans le dimensionnement des systèmes tournants. L'identification du type de mode est une formalisation des connaissances métier d'analyse des résultats, qui aide les concepteurs à gagner du temps tout en limitant le risque d'erreur. L'IHM inclut également un onglet de contexte à renseigner, tout comme l'activité de calcul des contraintes, voir la figure C.2.

### 4.1.5 Activité KBE pour la manipulation de la base de connaissances

La capitalisation des connaissances sert un objectif de réutilisation de données, informations et connaissances enregistrées. Comme la structure de la BDC est définie par le MM de la figure 3.4, les données à extraire sont enregistrées dans la BDC dont la structure est définie par les relations qui lient les différentes tables entre elles.

La BDC est construite sur SQLite, qui utilise le langage SQL pour converser, que ce soit pour effectuer des requêtes d'extraction des données ou bien pour effectuer des requêtes pour enregistrer de nouvelles données. Les requêtes offrent la possibilité d'accéder à n'importe quelle donnée de la BDC, et ainsi de retrouver des informations en fonction de différents critères. Il est par exemple possible d'obtenir la liste de toutes les activités réalisées, et qui ont été capitalisées, par la requête suivante :

```
SELECT *  
FROM Activity;
```

Ou bien, si l'étude doit être restreinte entre deux dates, la requête suivante peut être appliquée pour obtenir des résultats plus précis sur une période définie :

## 4.1. IMPLÉMENTATION DE L'APPLICATION KANO

---

```
SELECT *
FROM Activity
WHERE real_start_date > YYYY-MM-DD hh:mm:ss
AND real_start_date < YYYY-MM-DD hh:mm:ss;
```

D'autres requêtes, plus avancées, servent à récupérer les données d'un plan d'expérience pour les traiter et les analyser dans un second temps. Par exemple, il est souvent intéressant de récupérer les fréquences obtenues par la modélisation d'une ligne de transmission pour laquelle un ou plusieurs paramètres ont varié, afin de réaliser une analyse de sensibilité des données de sorties en fonction de la variabilité des données d'entrée. Dans le cas où 10 simulations seraient réalisées, avec les identifiants activités `id_activity` allant de 156 à 165 inclus, alors un exemple de requête pour récupérer ces données serait :

```
SELECT id_parameter ,
       parameter_value ,
       activity_input_output ,
       input_output_description
FROM ActivityInputOutput
WHERE id_activity > 154 AND id_activity < 166;
```

Les concepteurs interagissent avec la BDC par l'intermédiaire de l'IHM et des requêtes SQL. Or, les concepteurs sont rarement formés sur ce langage pour pouvoir rechercher les informations souhaitées avec efficacité. La solution implémentée a été de choisir quelques requêtes de base, les plus recherchées, pour les encoder et pouvoir les proposer aux concepteurs à travers l'IHM. Or, il est évident que cette solution n'est pas optimale, et avec le récent essor des modèles d'IA, la recherche d'informations dans la BDC pourrait être grandement facilitée. En effet, une des pistes serait de faire comprendre la structure des connaissances à l'IA, pour ensuite que les concepteurs communiquent avec elle en langage naturel pour obtenir les informations recherchées. Cette solution n'a pas été implémentée mais offre à nos yeux des perspectives intéressantes.

Pour faciliter ce travail d'accès aux données aux concepteurs, qui ne sont pas nécessairement familiers avec le langage SQL, plusieurs requêtes types sont préenregistrées dans l'application pour faciliter les recherches les plus courantes. Par exemple, obtenir la liste des activités réalisées ou les données utilisées pour générer un modèle spécifique possèdent une requête type. L'IHM de l'application qui sert aux concepteurs à interagir avec la BDC est présentée en annexe, à la figure C.8. Sinon, l'utilisateur peut également naviguer dans les différentes tables de la BDC en utilisant le système de navigation présenté sur la figure C.7.

## 4.2 Définition du protocole de validation

L'objectif des expérimentations est de valider la mesure de la performance du processus de conception avec les KPI du système de mesure proposé au chapitre 3. La mesure du gain de performance est obtenue par la comparaison entre les performances du processus *as-is*, qui n'utilise pas de ressources KBE, et du processus *to-be* qui les intègre. Pour rappel, la comparaison de deux situations est un des moyens de valider les recherches en sciences de la conception d'après la DRM.

Pour cela, les concepteurs utilisent le logiciel KBE implémenté dans le cadre de ces travaux, à travers l'application KANO, pour réaliser des activités de prédimensionnement. Le PDP de prédimensionnement utilisé comme référence, présenté en figure 1.13, est utilisé pour relever les valeurs des indicateurs de performance pour la configuration *as-is*. La figure 4.9 vient enrichir le processus initial de la figure 1.13 par l'ajout d'une nouvelle ressource (les systèmes KBE) qui constitue l'état final du processus, le processus *to-be*, représenté en rouge.

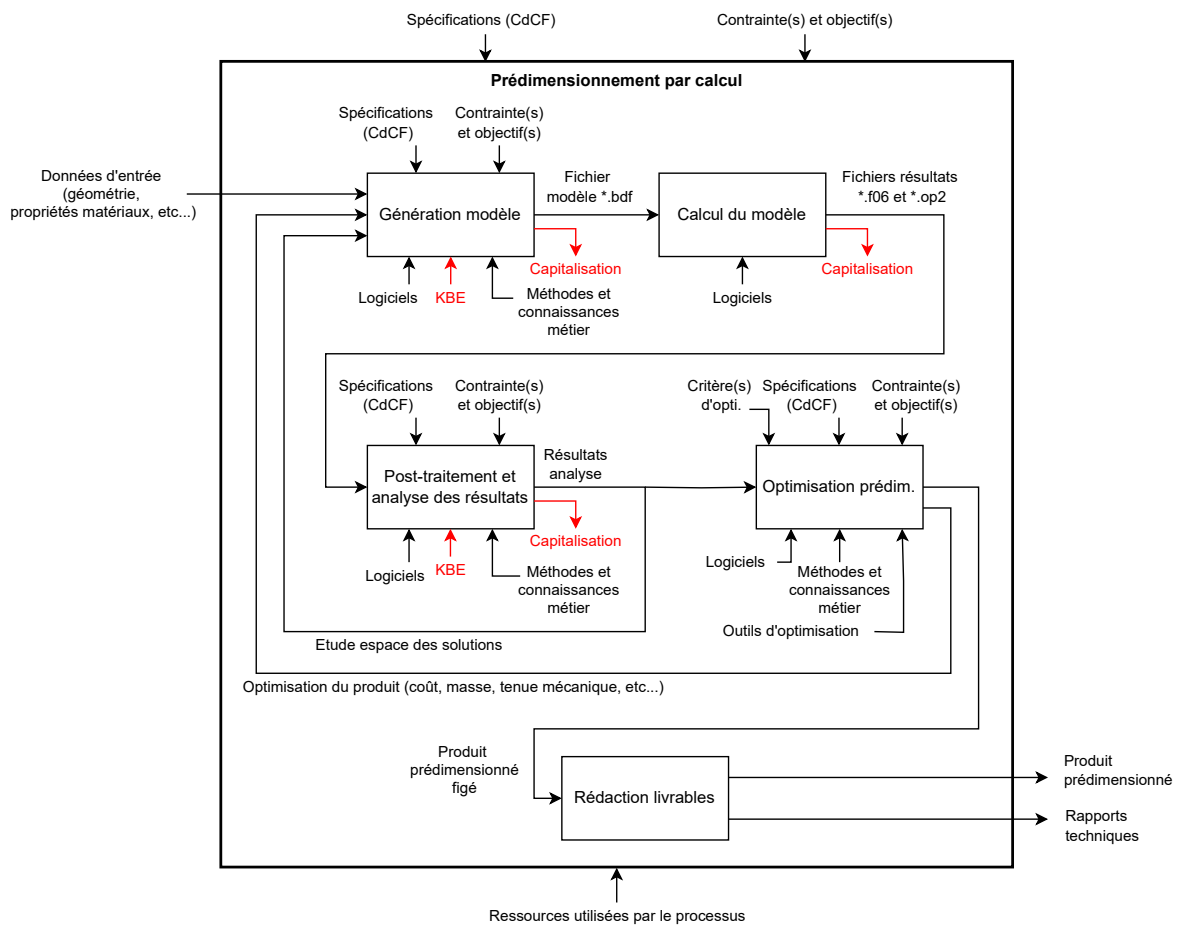


FIGURE 4.9 – Processus de prédimensionnement utilisé pour la validation expérimentale avec en noir le processus *as-is* et en rouge les différences apportées par le processus *to-be*

## 4.2. DÉFINITION DU PROTOCOLE DE VALIDATION

---

Un objectif sous-jacent de la validation est également de démontrer que les méthodes KBE sont adaptées pour réaliser une capitalisation des connaissances peu invasive et qui augmente également la performance développée. Le gain de performance est apporté par la recherche et la réutilisation des connaissances à travers un outil métier et un MM de capitalisation adaptés.

Le processus de prédimensionnement, utilisé pour valider la proposition, est simplifié par rapport aux activités qui seraient à réaliser lors d'un véritable processus industriel. Les activités qui sont conservées sont uniquement celles pour lesquelles les outils métier ont été développés dans le logiciel KANO, à savoir : le calcul des fréquences propres d'une ligne de transmission et le calcul des contraintes de torsion d'un arbre composite. Ces activités sont à réaliser en fonction d'un CdCF et d'une architecture de ligne de transmission déterminée. Cette dernière limite alors l'étude au prédimensionnement, et évite l'étude du choix des concepts. Cela est justifié par le fait que le choix des concepts est influencé par d'autres critères que les seuls résultats des deux activités de prédimensionnement considérées. Les résultats obtenus seraient alors plus difficiles à interpréter, et des biais pourraient être introduits par cette approche. Comme la structure de la ligne de transmission est définie par le CdCF, certains paramètres de conception comme les longueurs des composants sont figés pour restreindre l'espace des solutions et mieux définir le périmètre de l'étude. Pour les concepteurs qui réalisent le processus de prédimensionnement, les données d'entrée sont donc un CdCF, qui sera présenté dans les prochaines pages, ainsi qu'un concept d'architecture de ligne de transmission.

Comme les systèmes KBE n'interviennent pas aux étapes de « génération du modèle » et de « post-traitement et analyse des résultats », comme illustré sur la figure 4.9, alors la variation de performance du processus étudié n'est impactée que par la réalisation de ces deux activités. De même, l'« optimisation du prédimensionnement » consiste à itérer sur ces mêmes activités pour améliorer la qualité finale du produit par rapport à certains objectifs, ce qui accentue le rôle central des deux activités nommées. Dans un souci de temps de réalisation des expérimentations par les concepteurs, il n'est pas nécessaire de réaliser le processus de prédimensionnement dans son ensemble. Les expérimentations se concentrent sur les premières étapes de l'étude du concept. Les activités d'optimisation sont estimées par retour d'expérience pour limiter la durée totale d'expérimentation des concepteurs. De même, la rédaction des livrables est considérée similaire dans les deux approches (*as-is* et *to-be*) car les systèmes KBE n'impactent pas cette activité, donc les données sont également estimées par retour d'expérience. Ainsi, l'étude est limitée aux quatre « premières » activités du PDP figure 4.9, présentées dans le tableau 4.1. L'activité de « génération du modèle » est réalisée deux fois pour étudier les différences de performance, notamment dans le cas où le modèle n'est pas entièrement à créer car une première modélisation est réutilisable en modifiant quelques paramètres.

TABLE 4.1 – Identification des premières activités du PDP pour la mise en œuvre expérimentale de la proposition

Activité	Notation
Génération du modèle (1ère réalisation)	GEN_1
Calcul du modèle (1ère réalisation)	CAL_1
Post-traitement et analyse des résultats (1ère réalisation)	ANA_1
Génération du modèle (2ème réalisation)	GEN_2

## 4.2. DÉFINITION DU PROTOCOLE DE VALIDATION

---

De même, pour simplifier la distinction des activités réalisées entre l'étape d'« étude du concept » et l'étape d'« optimisation », la notation du tableau 4.2 est utilisée.

TABLE 4.2 – Identification des activités du PDP pour estimer les valeurs des indicateurs

Activité	Étape	Notation
Génération du modèle	Étude du concept	GEN_E
Calcul du modèle	Étude du concept	CAL_E
Post-traitement et analyse des résultats	Étude du concept	ANA_E
Génération du modèle	Optimisation du concept	GEN_O
Calcul du modèle	Optimisation du concept	CAL_O
Post-traitement et analyse des résultats	Optimisation du concept	ANA_O
Rédaction des livrables	Rédaction des livrables	RED_L

La validation des indicateurs de performance, proposés dans le chapitre 3, comprend le KPI de la mesure de l'efficacité d'une activité ou d'un processus. Pour quantifier le KPI d'efficacité, les objectifs des activités (du processus figure 4.9) sont explicités pour être comparés aux résultats obtenus dans le tableau 4.3. Comme la différence entre les sorties et les entrées est considérée constante pour le calcul de l'efficacité par hypothèse, l'efficacité de chaque activité n'est pas à relever puisqu'il n'y a pas de différence entre le processus *as-is* et *to-be*.

TABLE 4.3 – Objectifs des activités du sous-processus de prédimensionnement

Activité	Objectif(s)
Processus de prédimensionnement	Obtention d'un produit prédimensionné en fonction des contraintes du CdCF, et optimisé pour certains usages, ainsi que des justificatifs techniques qui attestent du bon respect des contraintes imposées.
Génération modèle	Générer un modèle d'ingénierie tel qu'il permet de réaliser une analyse de prédimensionnement.
Calcul du modèle	Réaliser le calcul d'un modèle d'ingénierie pour l'obtention des données qui orientent le processus de prédimensionnement.
Post-traitement et analyse des résultats	Analyser les données pour vérifier la conformité d'un concept par rapport aux spécifications, et orienter le processus de prédimensionnement en fonction des résultats obtenus.
Optimisation du prédimensionnement	Analyser les résultats du concept vis-à-vis des critères d'optimisation et des spécifications pour orienter les choix d'optimisation.
Rédaction des rapports techniques sur ce prédimensionnement	Rédiger les rapports techniques pour formaliser l'ensemble des éléments nécessaires à la justification par calcul du prédimensionnement d'une pièce en vue de les communiquer à l'entité chargée du contrôle (client, autorités de certification, autre).

## 4.2. DÉFINITION DU PROTOCOLE DE VALIDATION

---

Les concepteurs qui réalisent les expérimentations pour la validation des propositions de ces travaux sont des ingénieurs du BE de l'entreprise Nexteam Group. Les concepteurs ont des profils d'expérience variés, notamment en ce qui concerne le calcul EF et la connaissance des matériaux composites, tels que présentés dans le tableau 4.4 ci-dessous :

TABLE 4.4 – Présentation des concepteurs pour la réalisation des essais

ID concepteur	Poste	Expérience calcul (années)	Expérience composite (années)
1	Responsable R&T	15	1.5
2	Calculateur	15	0
3	Calculateur	2	0
4	Alternant calcul	1	0.5
5	Doctorant conception	1	1.5

### 4.2.1 Les outils de conception

#### Outils pour la génération du modèle

Tout d'abord, pour le calcul des fréquences propres de la ligne de transmission dans le processus *as-is*, il a été vu dans le chapitre 1, en section 1.5.2, que les concepteurs ont à leur disposition plusieurs outils pour générer le modèle d'une ligne de transmission :

- Tableur pour le calcul de poutres en flexion.
- Modélisation EF 1D sur le logiciel Patran.
- Modélisation EF 1D sur le logiciel rotorINSA.
- Modélisation EF 2D/3D sur le logiciel Patran.

À ces outils s'ajoute désormais l'outil KBE de modélisation des lignes de transmission intégré dans le logiciel KANO, qui utilise une forme paramétrique de modélisation EF 1D sur le logiciel Patran, ainsi que la BDC développée.

Afin de respecter l'hypothèse de « différence des connaissances constante », faite dans la section 3.3.2 pour définir le gain d'efficacité, la comparaison doit se faire sur le même type d'activité. Ainsi, à l'issue des activités de prédimensionnement en fréquence des lignes de transmission, les informations obtenues doivent être similaires pour respecter notre hypothèse, et ce indépendamment des outils choisis. Cette hypothèse reste valide pour des modélisations proches réalisées avec des méthodes ou outils différents, car les différences de connaissances finales sont minimales. Une certaine tolérance est nécessaire pour pouvoir comparer deux approches ou outils différents, puisqu'ils apportent nécessairement quelques différences dans les connaissances finales. Il s'agit alors de s'assurer que l'ordre de grandeur des connaissances acquises reste similaire. Par exemple, une modélisation par EF 2D/3D donne des résultats plus précis qu'une modélisation par EF 1D, mais les informations utiles aux choix de conception (pour le positionnement fréquentiel) sont relativement proches (les fréquences propres de flexion des arbres). Il y aura en revanche plus de connaissances apportées sur les autres composants, comme les paliers ou les accouplements flexibles, qui bénéficient d'une modélisation plus représentative que par la modélisation EF 1D.

## 4.2. DÉFINITION DU PROTOCOLE DE VALIDATION

---

Il en est de même pour le calcul des contraintes de torsion de l'arbre de transmission. Les trois méthodes de modélisation d'un arbre de transmission composite *as-is* ont été présentées au chapitre 1, en section 1.5.1 :

- Tableur pour le calcul des contraintes d'un élément de plaque composite.
- Modélisation EF 2D sur le logiciel Patran.
- Modélisation EF 2D-3D sur le logiciel Abaqus.

L'outil développé dans le logiciel KANO aide à modéliser les arbres composites par une représentation en EF 2D sur le logiciel Patran. De façon à respecter la même hypothèse que pour le calcul des fréquences, les concepteurs vont réaliser l'activité avec les outils *as-is* et *to-be* similaires : la différence entre les connaissances de sortie et les connaissances d'entrée est ainsi limitée pour des activités réalisées avec des méthodes et outils différents.

### Outils pour le post-traitement et l'analyse des résultats

Les outils utilisés pour le post-traitement et l'analyse des résultats sont moins développés, et correspondent plutôt aux méthodes qui sont formalisées dans des documents. Elles représentent le cœur des connaissances métier car ce sont sur ces bases que les concepteurs orientent les décisions de conception. Les méthodes d'analyse des deux activités de prédimensionnement étudiées, valables pour les processus *as-is* et *to-be*, sont présentées en suivant.

Pour le calcul des fréquences propres en flexion, le post-traitement concerne l'identification du type de mode propre (axial, flexion, radial, torsion). La connaissance du type de mode est centrale pour identifier le positionnement des fréquences propres de flexion, qui sont les plus critiques pour le prédimensionnement de la ligne de transmission.

Pour le calcul des contraintes en torsion, le post-traitement consiste à appliquer les critères de rupture basés sur les différentes contraintes principales du composite. Le concepteur doit donc savoir quel critère appliquer parmi les nombreux existants, identifier les zones critiques de l'arbre, et savoir comment interpréter les résultats obtenus avec les critères de rupture.

### 4.2.2 Définition du cahier des charges

La définition d'un CdCF et d'une architecture de ligne de transmission constituent les données de base des concepteurs pour le processus de prédimensionnement. Ces éléments sont explicités pour assurer de communiquer un maximum d'informations qui rendraient cette expérimentation reproductible avec le même contexte d'étude et les mêmes données de base, mais des outils métier différents. Le CdCF utilisé pour la réalisation des expérimentations est présenté dans le tableau 4.5, et le détail des spécifications qu'il contient est présenté en suivant.

Les spécifications du CdCF intègrent des exigences sur le poids maximal de l'arbre en composite développé, notamment pour l'optimisation du produit en ce qui concerne la masse embarquée. Le poids

## 4.2. DÉFINITION DU PROTOCOLE DE VALIDATION

---

et les coûts (coûts de fabrication, coûts récurrents, etc...) sont les deux principaux critères d'optimisation des lignes de transmission, dont les arbres de transmission.

TABLE 4.5 – Cahier des charges pour le prédimensionnement d'un arbre composite

Exigence	Valeur
Poids maximal	N/D
Coût maximal unitaire	N/D
Longueur	1500 mm
Diamètre extérieur maximal tube	85 mm
Diamètre extérieur maximal bride	150 mm
Couple nominal	1000 N.m
Couple ultime	1500 N.m
Vitesse nominale	70 Hz
Borne supérieure fréquences interdites (flexion)	85 Hz
Borne inférieure fréquences interdites (flexion)	50 Hz
Interface moteur et récepteur	3 vis M10 au Ø110 mm
Contrainte accessibilité montage	3 écrous au Ø110 (décalés de 60° par rapport aux vis)

Il est possible que le développement de ligne de transmission soit réalisé dans le cadre d'un *retrofit*, soit une reconception d'un composant ou d'un système sur un appareil existant pour l'optimiser. Dans ce cas-là, l'environnement est adapté à l'ancien composant et représente une contrainte d'espace forte. De même, l'espace alloué au redéveloppement du système contraint l'ordonnancement du montage et de la maintenance de ce système. Ces contraintes se caractérisent par un diamètre de tube et un diamètre de bride maximal pour l'arbre par exemple dans ce cas illustratif. La longueur de l'arbre est un paramètre qui peut se retrouver figé dans le cas d'un *retrofit* ou lorsqu'un concept de ligne de transmission est verrouillé.

Le couple est un élément du CdCF essentiel pour dimensionner un arbre de transmission. Cette spécification est la plus importante à considérer pour le calcul des contraintes de l'arbre en torsion. Le couple est généralement exprimé sous la forme d'un couple « nominal », c'est-à-dire lorsque l'aéronef fonctionne à sa vitesse nominale, mais il existe aussi les couples « limite » et « ultime » qui sont des valeurs de couples pour les cas de fonctionnement les plus exigeants pour l'appareil, auxquels sont appliqués des coefficients de sécurité. D'autres spécifications de couple sont utilisées, notamment en fatigue avec les couples « HCF » (*High Cycle Fatigue*) et « LCF » (*Low Cycle Fatigue*), mais ne font pas l'objet de cette étude et ne sont donc pas incluses dans les spécifications.

La vitesse de rotation est la contrainte principale pour le positionnement fréquentiel de la ligne de transmission. De même que pour le couple, une vitesse « nominale » sert de référence pour le fonctionnement de l'appareil, mais ce sont les bornes supérieures et inférieures de la (ou des) plage de fréquences interdites qui sont utilisées pour dimensionner la ligne de transmission. Les bornes supérieures et inférieures sont positionnées en fonction des plages de fonctionnement des turbines de l'appareil, auxquelles sont ajoutés des coefficients de sécurité qui sont souvent importants, de l'ordre de 20 à 25 %. Ces coefficients sont choisis à cause des incertitudes importantes sur les fréquences

## 4.2. DÉFINITION DU PROTOCOLE DE VALIDATION

---

d'excitation présente en vol, et qui sont susceptibles de conduire à un endommagement du système et en particulier des arbres.

Enfin, la dernière contrainte considérée dans ce CdCF concerne les interfaces des arbres. Ces derniers sont fixés à des organes moteurs et des organes récepteurs, et notre cas d'étude impose que cette liaison d'interface soit réalisée par l'intermédiaire de vis. Des interfaces alternatives existent, notamment avec l'utilisation de cannelures, mais ne font pas l'objet de cette analyse. D'autres contraintes existent sur une liaison vissée, notamment en ce qui concerne le montage des organes moteur ou récepteur comme leur accessibilité ou le type d'accouplement. Cela peut imposer d'avoir accès à certaines zones, ce qui se répercute sur la forme de la bride. C'est en particulier le cas pour les accouplements flexibles de type « flector », présentés dans le premier chapitre sur la figure 1.15 (haut-gauche), qui requièrent trois accès de chaque côté des lamelles déformables pour être assemblés.

Une fois le CdCF défini, la définition d'une architecture de ligne de transmission est nécessaire pour réaliser les expérimentations. Le choix d'une architecture simplifie le processus de prédimensionnement en limitant l'étude au processus de prédimensionnement par calcul, voir figure 1.12. L'architecture retenue pour la validation de ces travaux est extraite et adaptée de projets du BE de l'entreprise Nexteam Group, et elle est représentée en figure 4.10.

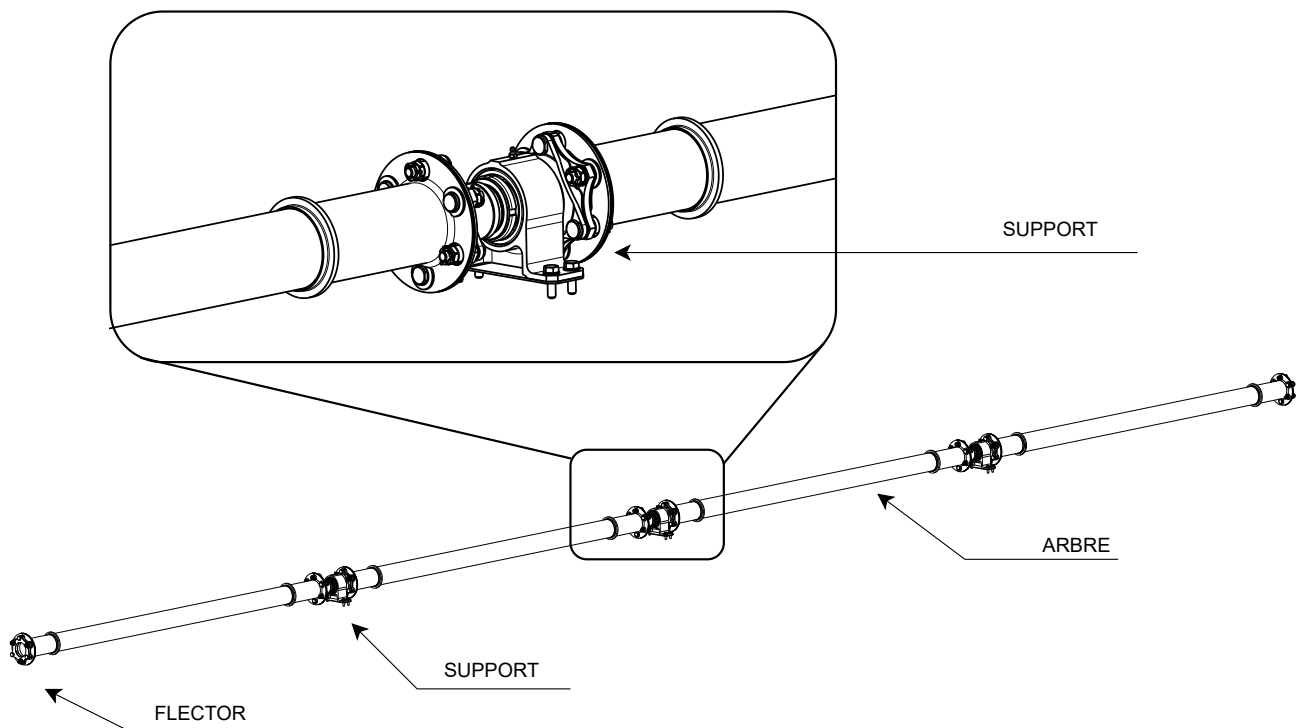


FIGURE 4.10 – Illustration de l'architecture utilisée pour les expérimentations de validation de la proposition scientifique

## 4.2. DÉFINITION DU PROTOCOLE DE VALIDATION

Afin d'améliorer la compréhension des différents composants, la transmission représentée sur la figure 4.10 est modélisée par les composants unitaires développés dans le logiciel KANO, ce qui se traduit par la structure visible sur la figure 4.11.

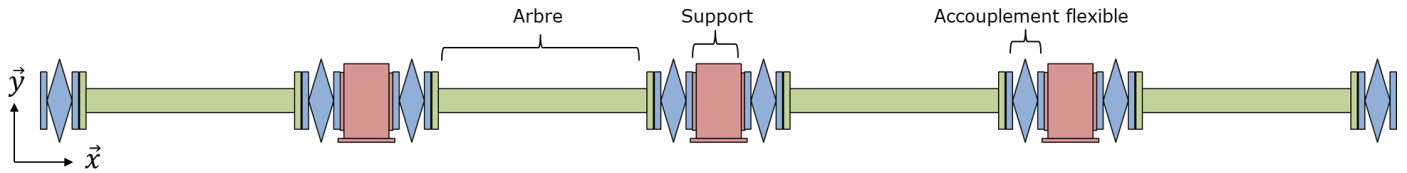


FIGURE 4.11 – Schéma de l'architecture utilisée pour les expérimentations de validation de la proposition scientifique

Cette architecture est composée de quatre arbres, à chaque fois encadrés par deux accouplements flexibles de type « flectors » (visibles sur la figure 1.15 en haut à gauche). Entre chacun de ces ensembles « arbre-flectors », un support est présent pour assurer le maintien de la ligne de transmission à la structure de l'aéronef. Les propriétés de ces composants sont présentées dans le tableau 4.6.

TABLE 4.6 – Paramètres des différents composants de la ligne de transmission utilisée pour valider la proposition scientifique

Propriété	Unité	Arbre	Flector	Support
Longueur	mm	1500.0	16.0	150.0
Centre de rotation	mm	N/D	8.0	50.0
Diamètre moyen	mm	<b>TBD</b>	110.0	55.0
Epaisseur moyenne	mm	<b>TBD</b>	12.0	3.0
Raideur axiale X	N/mm	N/D	500.0	1.0e+8
Raideur radiale Y	N/mm	N/D	5.0e+4	5.0e+3
Raideur radiale Z	N/mm	N/D	5.0e+4	5.0e+3
Raideur torsion X	N.mm/rad	N/D	5.0e+8	N/D
Raideur flexion Y	N.mm/rad	N/D	100.0	1.0e+9
Raideur flexion Z	N.mm/rad	N/D	100.0	1.0e+9
Matériau	-	<b>TBD</b>	Acier	Acier
Module d'Young	MPa	<b>TBD</b>	210.0e+3	210.0e+3
Coefficient de Poisson	-	<b>TBD</b>	0.28	0.28
Module de cisaillement	MPa	<b>TBD</b>	82.0e+3	82.0e+3
Masse volumique	g/cm <sup>3</sup>	<b>TBD</b>	7.8	7.8
Masse bride gauche	g	<b>TBD</b>	N/D	500.0
Masse bride droite	g	<b>TBD</b>	N/D	500.0
Masse totale	g	<b>TBD</b>	650	3000

Les paramètres essentiels pour modéliser les composants « flectors » et « supports » sont renseignés dans le tableau. Les paramètres marqués comme « **TBD** » pour les arbres de transmission sont donc les paramètres de conception à définir pour prédimensionner le concept de ligne. Il s'agit donc pour

## 4.2. DÉFINITION DU PROTOCOLE DE VALIDATION

---

les concepteurs d'identifier les dimensions géométriques ainsi que le matériau adaptés pour répondre au CdCF. Les valeurs « N/D », pour « non défini », sont déclarées lorsque le paramètre ne représente pas physiquement le système. Les conditions limites ne sont pas précisées dans ce tableau : tous les supports sont encastrés sur la structure de l'aéronef, donc aucune translation ni aucune rotation n'est autorisée. Pour le premier et le dernier flector de la ligne de transmission, toutes les translations sont bloquées et seules les translations en Y et Z, hors de l'axe de rotation de la transmission en X, sont bloquées.

Maintenant que le processus de prédimensionnement est défini et qu'un concept d'architecture de ligne de transmission est proposé, la prochaine sous-section va détailler les données à relever durant les expérimentations.

### 4.2.3 Données à mesurer

Pour quantifier le gain de performance qu'apportent les méthodes KBE sur les processus de conception, les concepteurs vont relever les indicateurs pour construire les KPI définis dans le chapitre 3. Ces indicateurs sont construits à l'échelle des activités tout d'abord, puis du processus dans lequel ces activités sont réalisées. Les données des activités sont mesurées par des expérimentations, tandis que les données des processus complets seront estimées par retour d'expérience pour limiter la durée des études. Les figures 4.12 et 4.13 synthétisent les données à relever lors du protocole expérimental de validation des indicateurs de performance. Cela aide à identifier l'ensemble des paramètres que les concepteurs ont à relever lors du protocole expérimental, ainsi que les moments auxquels ils sont mesurés. Les premiers paramètres à relever sont tout d'abord ceux qui sont relevés à l'issue de chaque activité, rassemblés sur la figure 4.12.

Cette figure rassemble les différentes données d'entrée et de sortie à l'échelle d'une activité  $i$  réalisée dans le processus  $k$  (qui peut prendre les valeurs « *as-is* » ou « *to-be* ») :

- La mesure de l'efficacité de l'activité, comprise en 0 et 1, caractérise le niveau de satisfaction des exigences attendues à l'issue d'une activité. Cette valeur est estimée par l'utilisateur de l'activité, ce qui est source de subjectivité, faute d'existence d'une échelle de mesure dans la littérature scientifique.
- Le coût de l'activité  $c_i$  est relevé à l'issue de chaque activité, mais il ne peut être intégré au calcul final d'efficacité qu'en utilisant les ratios de conversion du TJM, soit  $t_{ijm}$  et  $c_{tjm}$ . Ces données sont définies comme des constantes pour le processus analysé. En pratique, ces valeurs sont dépendantes du TJM de l'utilisateur réalisant le processus, qui peut fortement varier au sein des BE.
- Les différentes durées sont relevées pour déterminer les différents KPI qui en découlent, notamment pour déterminer le gain d'efficacité d'une activité ou d'un processus. Les durées de recherche d'informations  $t_{ri}$ , de réalisation  $t_{ui}$  et de capitalisation  $t_{ci}$ , sont relevées pour les activités *as-is* et *to-be*. La première peut par ailleurs être décomposée en une composante de

## 4.2. DÉFINITION DU PROTOCOLE DE VALIDATION

recherche des informations hors des BDC (manuelle)  $t_{rmi}$ , et en une composante issue des BDC  $t_{rai}$  pour l'activité  $i$ . Le fait de mesurer la fréquence des recherches de chaque composante aide à déterminer la probabilité  $p$  de trouver l'information recherchée dans une BDC, soit en comptabilisant le nombre de fois où l'information a été trouvée dans la base par rapport au nombre total de requêtes, soit en l'estimant sur la base du retour d'expériences des utilisateurs de ces bases.

- Les poids des niveaux de capitalisation apportent une quantification des niveaux de capitalisation selon le tableau 3.5 pour chaque activité et pour chaque élément capitalisable du tableau 3.4. Cela correspond à l'identification du niveau de capitalisation pour les catégories des QQ-QCOP du tableau 3.4, conformément aux niveaux définis dans notre proposition. Le relevé des poids permet ensuite de définir le taux de capitalisation *taux\_capitalisation* qui est à mettre en relation avec les temps de capitalisation et la quantification d'un ROI associé à la capitalisation des connaissances.

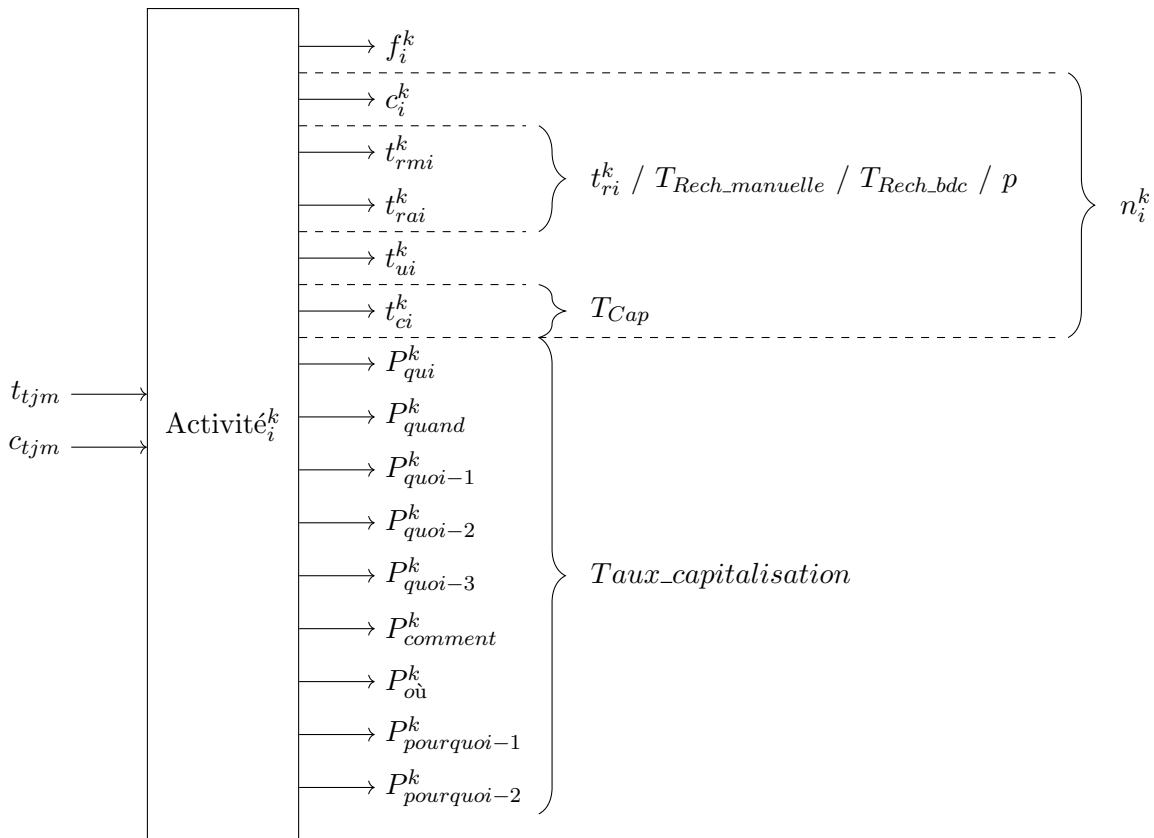


FIGURE 4.12 – Données à relever lors des activités pour la construction des KPI

À l'échelle du processus, les données mesurées pour construire les indicateurs clés sont rassemblées sur la figure 4.13. Les données prérequis en entrée pour définir les KPI sont en majorité issues et/ou déduites des mesures à l'échelle des activités. De fait, les données  $t_{tjm}$ ,  $c_{tjm}$ ,  $c^k$  et  $t^k$  sont par exemple nécessaires pour définir les indicateurs d'efficacité, plus précisément les dénominateurs puisqu'il a

## 4.2. DÉFINITION DU PROTOCOLE DE VALIDATION

---

été vu que le numérateur - la variation de connaissances - n'est pas quantifiable. L'efficacité  $f^k$  du processus est déterminée par l'atteinte des objectifs du processus, mais peut également se mettre en relation avec les efficacités des activités du processus  $k$  (*as-is* ou *to-be*). Enfin, les données requises pour caractériser le ROI de la capitalisation des connaissances sont utilisées pour construire l'indicateur, tout comme les données sur les poids de capitalisation relevés par activité sont utilisées pour évaluer le taux de capitalisation à l'échelle du processus.

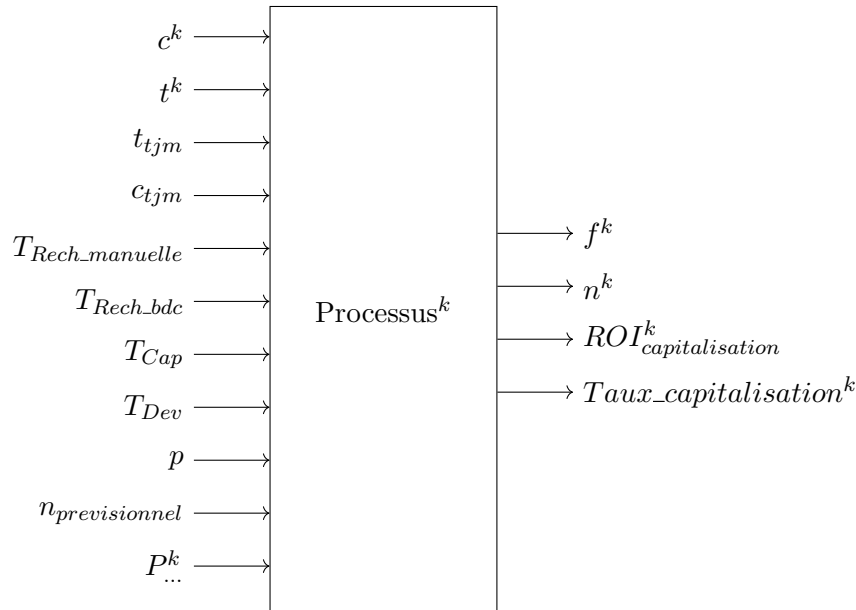


FIGURE 4.13 – Données à relever lors des processus pour la construction des KPI

Pour compléter les mesures réalisées sur les activités et le processus, un questionnaire est rempli par les concepteurs pour enrichir l'étude des KPI sur la base de leur expérience. Ces mesures complémentaires sont présentées dans la prochaine sous-section.

### 4.2.4 Relevé des mesures et questionnaire

L'analyse quantitative par la mesure des KPI est réalisée au moyen de tableaux que les concepteurs complètent avec les valeurs qu'ils vont soit mesurer lors des expérimentations, soit estimer à partir de leur expérience propre. Les mesures sont relevées pour les PDP *as-is* et *to-be*.

La première série de mesure est concentrée sur la mesure de la performance des activités de conception présentées dans le tableau 4.1. Pour cela, les différents temps de recherche des informations,  $t_{rm}$  pour la recherche hors BDC et  $t_{ra}$  pour la recherche dans une BDC, le temps de réalisation de l'activité  $t_u$  et le temps de capitalisation  $t_c$  sont relevés. Ils sont mesurés pour le prédimensionnement en fréquences de la ligne de transmission, dans le tableau 4.9, et pour le prédimensionnement en contraintes de l'arbre de transmission composite, dans le tableau 4.11. Ces mesures sont relevées pour le processus réduit *as-is*, réalisé avec les outils usuels de conception, ainsi que le processus réduit *to-be*, réalisé avec

## 4.2. DÉFINITION DU PROTOCOLE DE VALIDATION

---

le système KBE développé.

Les résultats obtenus pour les quelques activités de conception étudiées (4 pour le prédimensionnement en fréquence, et 4 pour le prédimensionnement en contraintes) sont ensuite étendus au processus de prédimensionnement complet. Pour cela, les concepteurs renseignent, sur la base de leur expérience, les tableaux 4.13 et 4.14. Le premier estime le nombre d'activités à réaliser durant le processus de prédimensionnement, tandis que le deuxième recueille les durées de recherche d'information  $t_i$ , de réalisation  $t_u$  et de capitalisation  $t_c$ . Les mesures sont, pour les deux tableaux, réalisées à la fois pour la situation *as-is* et pour la situation *to-be*.

Les relevés se poursuivent sur la mesure des poids des composantes du contexte à capitaliser. Les valeurs des paramètres  $P_{\dots}^k$  de la figure 4.13 sont réunies dans le tableau 4.7. Ces paramètres traduisent la richesse de la capitalisation effectuée pour chaque activité, et ils sont relevés à la fois pour la situation *as-is* et pour le cas *to-be*. Les valeurs renseignées pour les activités « GEN\_E », « CAL\_E » et « ANA\_E » (voir tableau 4.1) sont issues des réalisations des concepteurs, mais les valeurs de « GEN\_O », « CAL\_O », « ANA\_O » et « RED\_L » sont estimées par les concepteurs en fonction de leur expérience propre (voir tableau 4.2).

Le dernier tableau regroupe les valeurs des paramètres nécessaires au calcul du ROI de la capitalisation des connaissances, dans l'objectif de réduire les temps de recherche d'informations. Pour cela, les paramètres de recherche des informations manuelle  $T_{Rech\_manuelle}$ , c'est-à-dire en dehors d'une BDC, du temps de capitalisation  $T_{Cap}$  et du temps de recherche dans la BDC  $T_{Rech\_bdc}$  sont relevés. Certaines durées, comme  $T_{Rech\_manuelle}$  et  $T_{Cap}$ , sont confortées par les mesures  $t_{ri}$  et  $t_{ci}$  réalisées par les concepteurs lors des expérimentations. Les autres valeurs sont estimées par l'expérience des utilisateurs, comme par exemple la probabilité de trouver les informations souhaitées dans la BDC, qui est difficile à mesurer. Les valeurs de ces paramètres sont enregistrées dans le tableau 4.20.

Les valeurs de ces tableaux, présentés dans la prochaine section, sont souvent exprimées sous la forme d'une «  $\mu$  (moyenne)  $\pm \sigma$  (écart-type) ». La moyenne et l'écart-type sont calculés à partir des différents résultats pour une même variable que chaque concepteur renseigne indépendamment des autres. Les calculs des moyennes et écarts-types sont faits sur des échantillons de 3 à 5 valeurs, ce qui n'est pas suffisant pour avoir une bonne représentativité. Il arrive ainsi que la valeur de l'écart-type soit très élevée ou éloignée de la valeur moyenne si les réponses des concepteurs étaient très différentes les unes des autres, de même que la moyenne peut être influencée par des valeurs extrêmes. Alors, à cause de ces différences importantes, des variables comme des durées sont susceptibles d'être négatives et perdraient donc leur sens physique. En effet, si la représentation des données suit une distribution normale, ce qui n'est pas le cas de notre étude mais simplifie l'analyse par manque de données, alors 95 % des données sont comprises dans l'intervalle  $[\mu - 2\sigma; \mu + 2\sigma]$ , et 99.7 % dans l'intervalle  $[\mu - 3\sigma; \mu + 3\sigma]$ . Ainsi, les valeurs moyennes sont à considérer comme un indicateur de la tendance des KPI mesurés, tandis que l'écart-type est plutôt une estimation du niveau d'incertitude associé à la valeur moyenne. Une meilleure approche serait d'utiliser des distributions représentatives des variables d'intérêt, pour obtenir de meilleures estimations des incertitudes, mais estimer ces distributions requiert une quantité de données plus importante.

## 4.2. DÉFINITION DU PROTOCOLE DE VALIDATION

---

La présentation de ces mesures marque la fin de la section sur la définition du protocole de mesure expérimental, ce qui introduit la section suivante sur les résultats des expérimentations et les conclusions à en tirer. La validation du système de mesure commence par la performance de la capitalisation des connaissances, puis se poursuit sur l'évaluation de la performance des activités métier et du processus métier de prédimensionnement. Les expérimentations continuent avec l'évaluation des outils utilisés en ressources du processus métier, et s'achèvent sur l'évaluation du ROI du processus de capitalisation des connaissances.

### 4.3 Mise en œuvre sur les activités de conception

Une fois le logiciel KANO et le protocole expérimental présentés, cette section rassemble les différentes mises en application des indicateurs de performance présentés au chapitre 3. La figure 4.14 reprend la proposition illustrée de la figure 3.5 pour introduire la structuration de cette section sur les expérimentations.

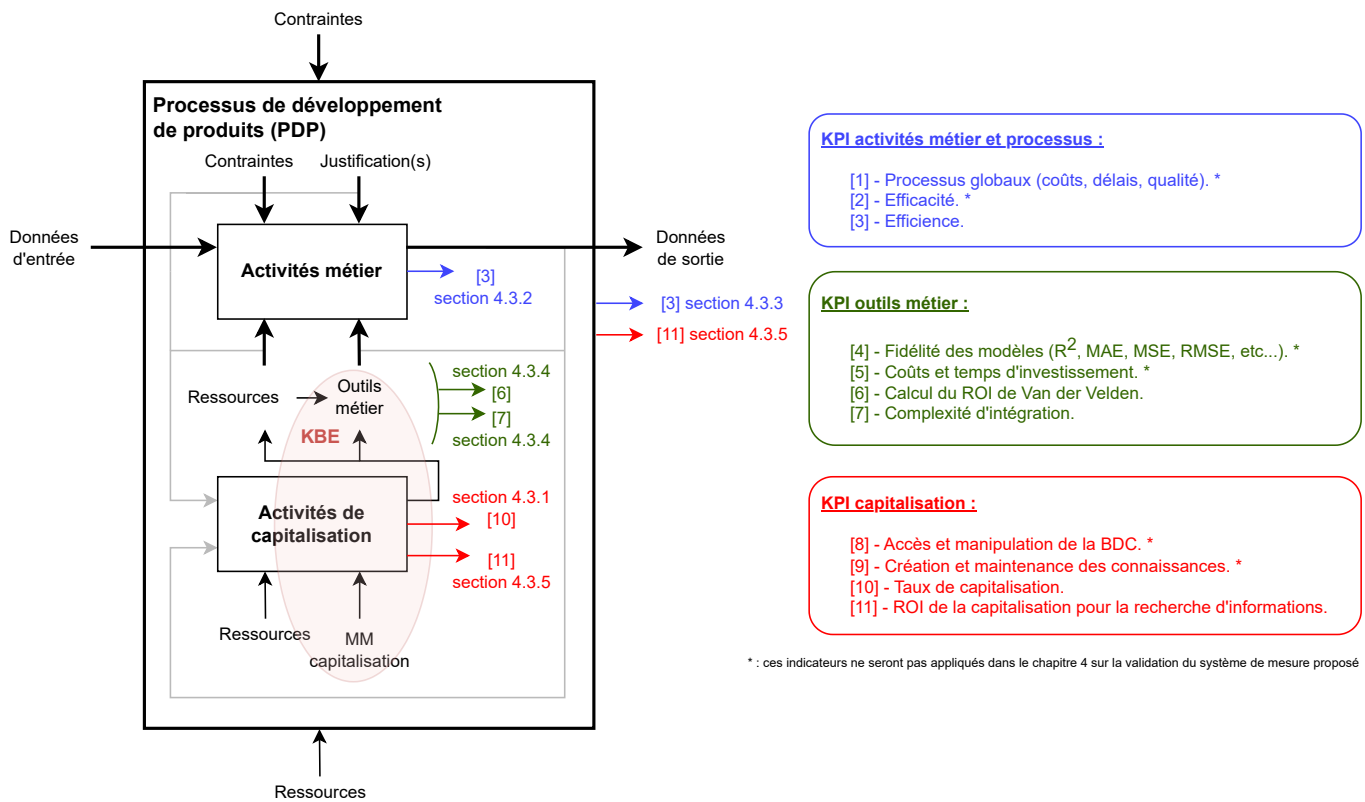


FIGURE 4.14 – Présentation de la structure de la section et des différents indicateurs étudiés

Le premier KPI mis en œuvre est le taux de capitalisation, qui renseigne sur le niveau d'informations du contexte QQQCOP capitalisé à l'issue de chaque activité.

#### 4.3.1 Mesure et estimation de la performance de la capitalisation

L'objectif de cette sous-section est d'utiliser l'indicateur du taux de capitalisation, présenté en section 3.3.3, sur les processus *as-is* et *to-be*. Pour rappel, ce KPI quantifie le poids des différentes composantes du QQQCOP qui sont capitalisées lors de la réalisation des activités, pour en déduire une valeur, comprise entre 0 et 1, traduisant le niveau de richesse des informations capitalisées. Les données sont colorées d'une teinte rouge si les valeurs sont proches de 0 et d'une teinte verte si elles sont proches de 4, le poids maximum. Lors des expérimentations, les concepteurs renseignent pour chaque

### 4.3. MISE EN ŒUVRE SUR LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION

activité et pour chaque composante QQQCOP, décrite dans le tableau 3.4, le niveau de capitalisation selon le tableau 3.5. En raison du processus de prédimensionnement réduit utilisé pour valider le système de mesure présenté, les données des colonnes GEN\_E, CAL\_E et ANA\_E sont identifiées à partir des mesures réalisées par les concepteurs, tandis que les données des colonnes GEN\_O, CAL\_O, ANA\_O et RED\_L sont estimées par leur retour d'expériences. Le tableau 4.7 est construit autour des activités de conception GEN\_E, CAL\_E, ANA\_E, GEN\_O, CAL\_O, ANA\_O et RED\_L, ainsi que des composantes du QQQCOP du tableau 3.4 pour les processus *as-is* et *to-be*. Les résultats sont la moyenne et l'écart-type des valeurs renseignées par les concepteurs pour une même variable, avec des entiers entre 0 et 4. Comme ça a été expliqué, en procédant de la sorte, il existe des configurations pour lesquelles l'écart-type est très important par rapport à la valeur de la moyenne.

TABLE 4.7 – Quantification de la richesse de la capitalisation des composantes du QQQCOP par activité du processus de prédimensionnement

	GEN_E	CAL_E	ANA_E	GEN_O	CAL_O	ANA_O	RED_L
$P_{qui}^{as-is}$	0.5 ± 0.6	0.3 ± 0.5	0.8 ± 0.5	1.3 ± 1.0	0.8 ± 1.0	1.5 ± 0.6	3.8 ± 0.5
$P_{quand}^{as-is}$	0.8 ± 0.1	0.8 ± 0.1	1.0 ± 0.8	1.0 ± 1.2	0.8 ± 1.0	1.3 ± 1.0	3.3 ± 0.5
$P_{quoi-1}^{as-is}$	1.5 ± 0.6	1.5 ± 0.6	1.8 ± 0.5	1.8 ± 1.0	1.5 ± 0.6	2.0 ± 0.8	3.8 ± 0.5
$P_{quoi-2}^{as-is}$	2.0 ± 0.8	2.0 ± 0.8	2.0 ± 0.8	2.5 ± 0.6	2.3 ± 0.5	2.5 ± 0.6	3.3 ± 1.0
$P_{quoi-3}^{as-is}$	2.0 ± 0.8	1.8 ± 1.0	2.0 ± 0.8	2.5 ± 0.6	2.0 ± 0.8	2.5 ± 0.6	3.5 ± 0.6
$P_{comment}^{as-is}$	1.3 ± 0.5	2.0 ± 1.4	1.0 ± 0.8	1.5 ± 0.6	2.0 ± 1.4	1.3 ± 1.0	3.3 ± 1.0
$P_{où}^{as-is}$	1.0 ± 1.4	1.0 ± 1.4	1.0 ± 1.4	1.0 ± 1.4	1.0 ± 1.4	1.0 ± 1.4	2.0 ± 1.8
$P_{pourquoi-1}^{as-is}$	1.3 ± 1.4	1.0 ± 1.2	1.3 ± 1.5	1.5 ± 1.3	1.3 ± 1.0	1.5 ± 1.3	3.3 ± 0.5
$P_{pourquoi-2}^{as-is}$	1.3 ± 1.0	1.3 ± 1.0	1.5 ± 1.3	1.3 ± 1.0	1.3 ± 1.0	1.5 ± 1.3	3.3 ± 0.5
$P_{qui}^{to-be}$	2.8 ± 1.3	2.8 ± 1.3	2.8 ± 1.3	2.8 ± 1.3	2.8 ± 1.3	2.8 ± 1.3	3.8 ± 0.5
$P_{quand}^{to-be}$	3.3 ± 1.0	3.3 ± 1.0	3.3 ± 1.0	3.3 ± 1.0	3.3 ± 1.0	3.3 ± 1.0	3.3 ± 0.5
$P_{quoi-1}^{to-be}$	3.0 ± 0.8	3.0 ± 0.8	3.0 ± 0.8	3.3 ± 0.5	3.3 ± 0.5	3.3 ± 0.5	3.8 ± 0.5
$P_{quoi-2}^{to-be}$	3.8 ± 0.5	4.0 ± 0.0	3.8 ± 0.5	3.8 ± 0.5	4.0 ± 0.0	3.8 ± 0.5	3.3 ± 1.0
$P_{quoi-3}^{to-be}$	3.8 ± 0.5	4.0 ± 0.0	3.3 ± 1.0	3.8 ± 0.5	4.0 ± 0.0	3.3 ± 1.0	3.5 ± 0.6
$P_{comment}^{to-be}$	3.3 ± 0.5	3.0 ± 0.8	2.5 ± 1.7	3.3 ± 0.5	3.0 ± 0.8	2.5 ± 1.7	3.3 ± 1.0
$P_{où}^{to-be}$	3.3 ± 1.0	3.3 ± 1.0	3.3 ± 1.0	3.3 ± 1.0	3.3 ± 1.0	3.3 ± 1.0	2.0 ± 1.8
$P_{pourquoi-1}^{to-be}$	3.0 ± 0.0	2.8 ± 0.5	2.5 ± 0.6	3.0 ± 0.0	2.8 ± 0.5	2.5 ± 0.6	3.3 ± 0.5
$P_{pourquoi-2}^{to-be}$	2.0 ± 0.0	2.0 ± 0.0	2.0 ± 0.0	2.0 ± 0.0	2.0 ± 0.0	2.0 ± 0.0	3.3 ± 0.5

La première conclusion tirée, d'après l'observation du tableau 4.7, est la différence des niveaux de capitalisation entre le processus *as-is* et le processus *to-be*, excepté pour l'activité RED\_L. En effet, pour cette dernière activité, le fait d'utiliser un système KBE n'influence pas les capacités de capitalisation de l'étape de rédaction des livrables, qui reste une activité majoritairement manuelle et dépendante des études réalisées. En revanche, pour les autres activités, les concepteurs ont estimé que l'utilisation d'un système KBE apporte un bénéfice sur la richesse des informations capitalisées, lorsqu'il est utilisé pour capitaliser les informations du contexte de réalisation. Ensuite, les données présentent une faible capitalisation des composantes  $P_{qui}^{as-is}$  et  $P_{quand}^{as-is}$  pour la majorité des activités, mais qui est améliorée par l'utilisation de l'outil KBE dans le processus *to-be*. Les  $P_{quoi-1}^{as-is}$ ,  $P_{quoi-2}^{as-is}$

### 4.3. MISE EN ŒUVRE SUR LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION

et  $P_{quoi-3}^{as-is}$  sont les informations le plus souvent capitalisées lors du processus *as-is*, bien que de manière incomplète, car ce sont les données accessibles des modèles qui seront archivés dans les silos de connaissances de l'entreprise. Il est ainsi possible de retrouver certaines informations à partir de ces modèles, bien qu'ils ne décrivent pas complètement l'ensemble des données utilisées. Enfin, les données de  $P_{comment}^{as-is}$ ,  $P_{où}^{as-is}$ ,  $P_{pourquoi-1}^{as-is}$  et  $P_{pourquoi-2}^{as-is}$  ont également une description peu riche, en raison de la capitalisation ponctuelle de certaines informations dans des présentations ou des comptes-rendus, par exemple en faisant référence à des méthodes ou en justifiant la réalisation des activités. Pour les éléments du processus *to-be*, les valeurs sont globalement réhaussées de 1 à 3 points en moyenne, et seules les valeurs de  $P_{quoi-2}^{to-be}$  et  $P_{quoi-3}^{to-be}$  restent légèrement supérieures aux autres grâce à une capitalisation plus exhaustive apportée par l'outil de capitalisation, grâce à une capitalisation complète des données utilisées.

Une fois ces données analysées, l'indicateur du taux de capitalisation est calculé et synthétisé dans le tableau 4.8. Ce tableau regroupe les valeurs du taux de capitalisation pour chaque activité et pour les processus *as-is* et *to-be*, afin d'estimer le gain moyen apporté par le modèle de capitalisation du système KBE de chaque activité. Les données de chaque processus sont exprimées sous la forme d'une moyenne et d'un écart-type, déduits à partir des valeurs du tableau 4.7.

TABLE 4.8 – Calcul des taux de capitalisation par activité du processus de prédimensionnement

Activité	Taux de capitalisation <i>as-is</i>	Taux de capitalisation <i>to-be</i>	Variation moyenne
GEN_E	0.39 ± 0.08	0.85 ± 0.06	117 %
CAL_E	0.41 ± 0.11	0.86 ± 0.05	112 %
ANA_E	0.39 ± 0.09	0.77 ± 0.11	98 %
GEN_O	0.48 ± 0.07	0.85 ± 0.06	75 %
CAL_O	0.45 ± 0.10	0.87 ± 0.05	94 %
ANA_O	0.48 ± 0.08	0.78 ± 0.11	60 %
RED_L	0.83 ± 0.09	0.83 ± 0.09	0 %

Tout d'abord, on remarque que seule l'activité de rédaction des livrables dépasse 0.5, soit 50 % des informations capitalisées, pour le processus *as-is*. Cela est cohérent dans la mesure où la synthèse des informations dans des livrables est une activité de capitalisation pure. Toujours pour le processus *as-is*, le taux de capitalisation est légèrement meilleur lors des étapes d'optimisation que lors des étapes d'étude de concept, ce qui s'explique par une meilleure collecte et formalisation des informations lorsque le concept monte en maturité et qu'il y a moins d'incertitudes. Ce constat n'est pas partagé dans le processus *to-be*, pour lequel les taux de capitalisation sont similaires entre l'étude du concept et l'optimisation. Pour la perspective du processus *to-be* qui généralise l'utilisation d'outils KBE, les concepteurs jugent que le taux de capitalisation est toujours supérieur à 0.5, et même à 0.55 dans 95 % des cas (0.77 - 2 écarts-types pour l'activité ANA\_E). Finalement, en étudiant les résultats moyens, l'utilisation d'un système de capitalisation augmenterait les taux de capitalisation entre 60 et 117 %, en excluant l'activité de rédaction des livrables pour laquelle le système KBE n'est pas l'objectif actuel. De plus, les principaux gains sont apportés durant l'étude du concept, durant lesquelles les activités capitalisent le moins les connaissances en raison des incertitudes autour du concept étudié. Le système KBE favoriserait donc la capitalisation des connaissances sur l'ensemble

### 4.3. MISE EN ŒUVRE SUR LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION

---

des activités réalisées pour explorer l'espace des solutions. Ce constat offre de bonnes perspectives pour étudier les liens entre causes et conséquences durant le processus de conception, et en particulier sur la justification des concepts techniques. Cela pourrait permettre d'orienter les concepteurs, durant les premières phases de développement, sur les meilleurs choix techniques en fonction des spécifications.

L'indicateur du taux de capitalisation, proposé en section 3.3.3, a démontré son intérêt pour tracer le niveau de capitalisation du contexte QQQCOP lors de la réalisation d'activités. Il a également démontré que l'utilisation de système KBE aide à augmenter le taux d'informations tracées et capitalisées, à travers l'utilisation d'un modèle formel de connaissances. Ce KPI offre donc un outil pour mesurer la performance de la capitalisation, tandis que l'évaluation de la réutilisation des connaissances passe l'évaluation du nombre d'utilisation d'outils métier ou encore par le calcul de l'indicateur de ROI de la recherche d'informations. La suite des expérimentations concerne la mesure de la performance des activités, à travers l'indicateur de gain d'efficacité proposé au précédent chapitre, sur les activités de prédimensionnement de lignes et d'arbres de transmission.

#### 4.3.2 Mesure de la performance des activités du processus métier de prédimensionnement

Les résultats obtenus dans les tableaux 4.9 et 4.11 ont été mesurés par les concepteurs lors de la réalisant des activités du processus de prédimensionnement. La démarche a été menée pour répondre au CdCF proposé au tableau 4.5 et pour la ligne de transmission figure 4.10. Les mesures ont tout d'abord été réalisées avec le processus usuel de Nexteam Group (*as-is*), puis avec les outils développés dans le logiciel KANO, soit le processus *to-be*.

Les concepteurs ont réalisé quatre activités de conception pour le prédimensionnement en fréquence de la ligne de transmission, et quatre activités pour le prédimensionnement en contrainte de l'arbre composite. Les quatre activités sont GEN\_1, CAL\_1, ANA\_1 et GEN\_2, présentées dans le tableau 4.1.

Etudions dans un premier temps les résultats pour l'étude du positionnement fréquentiel d'une ligne de transmission. Pour rappel, les grandeurs mesurées sont les durées de réalisation de différentes tâches, avec : le temps de recherche des informations manuel (hors BDC)  $t_{rm}$ , le temps de recherche des informations dans une BDC  $t_{ra}$ , le temps de réalisation de l'activité  $t_u$  et enfin le temps de capitalisation de l'activité  $t_c$ . Certaines activités ne permettent pas de relever certaines mesures, comme par exemple dans la situation *as-is* où la recherche d'informations dans une BDC est considérée impossible car uniquement dans le processus *to-be*. De même, il n'y a pas de recherche d'information, quelle qu'elle soit, lors de l'étape de calcul du modèle. Enfin, certaines mesures peuvent être nulles mais inférieures à notre unité de référence qui est la minute, ces valeurs sont donc présentées sans écart-type. Sinon, pour toutes les autres valeurs non nulles, elles sont présentées sous la forme d'une moyenne des résultats renseignés par les concepteurs, plus ou moins la valeur de l'écart-type. Certaines de ces variables ont également, comme pour d'autres valeurs présentées précédemment, des écarts-types importants en comparaison de la moyenne.

Le tableau 4.9 compare donc les durées réalisées, par les concepteurs de l'entreprise Nexteam Group, pour étudier le positionnement fréquentiel d'une ligne de transmission. Le premier élément

### 4.3. MISE EN ŒUVRE SUR LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION

important à relever est que les activités les plus consommatrices de temps sont les étapes de recherche d'information, ainsi que les étapes de réalisation des activités.

TABLE 4.9 – Résultats de l'expérimentation pour les mesures de temps du prédimensionnement en fréquences de l'arbre de transmission composite, exprimées en minutes

Activité	$t_{rm}^{as-is}$	$t_{ra}^{as-is}$	$t_u^{as-is}$	$t_c^{as-is}$	$t_{rm}^{to-be}$	$t_{ra}^{to-be}$	$t_u^{to-be}$	$t_c^{to-be}$
GEN_1	54 ± 46	-	101 ± 45	1 ± 1	24 ± 21	5 ± 4	29 ± 9	< 1
CAL_1	-	-	< 1	0	-	-	< 1	< 1
ANA_1	10 ± 14	-	16 ± 10	0	0	0	3 ± 1	< 1
GEN_2	0	-	21 ± 10	1 ± 1	0	0	23 ± 5	< 1

Concentrons-nous tout d'abord sur les données *as-is*. Le temps de recherche est important lors de la première modélisation *as-is*, puisque c'est à ce moment que le concepteur cherche l'ensemble des informations pour initier le processus de conception. Le temps de 54 ± 46 minutes correspond à la recherche des informations sur la modélisation à réaliser, incluant les propriétés, la géométrie, la méthode ou encore l'analyse du CdCF fourni. En revanche, le temps passé de 10 ± 14 sur l'analyse sert plutôt à savoir comment interpréter les résultats, de façon à orienter les prochaines étapes de conception. Lors de la deuxième modélisation de la ligne de transmission, il n'y a pas de nouvelles recherches d'informations : les concepteurs ont en général toutes les informations nécessaires de la première étape de conception, et dans ce cas-là ils ajustent le premier modèle, réalisé à l'étape GEN\_1, lors l'étape GEN\_2 pour converger vers une solution admissible. C'est également pour les mêmes raisons que le temps de réalisation  $t_u$  diminue fortement entre ces deux activités, passant de 101 ± 45 minutes à 21 ± 10 minutes. Les deuxièmes temps de calcul CAL\_2 et d'analyse ANA\_2 ne sont pas relevés mais sont considérés similaires aux premiers temps réalisés. Les temps de capitalisation sont faibles, en comparaison avec les autres durées relevées. Ces temps sont à mettre en relation avec le tableau d'analyse des taux de capitalisation 4.7. En effet, un temps faible peut signifier soit une très grande performance dans la réalisation de la capitalisation, soit que cette étape n'est (presque) pas réalisée. Or, il a été vu, après analyse des données du tableau 4.7, que les activités du processus *as-is* sont très peu capitalisées du fait du manque de méthodes et/ou d'outils adaptés. Les quelques minutes passées, sur les activités GEN\_1 et GEN\_2, sont le résultat de l'enregistrement du modèle réalisé sur les serveurs de l'entreprise, ce qui capitalise quelques informations comme le modèle final (donnée de sortie), mais également les propriétés et paramètres d'entrée nécessaires au développement du modèle. D'autres informations du QQQCOP sont également prises en compte comme la date, contenue dans les méta-données du fichier du modèle.

Nous pouvons maintenant analyser les données relevées avec le logiciel KANO dans le processus *to-be*. La distribution des durées est proche de celles du processus *as-is*, avec du temps passé principalement en recherche d'information et en réalisation des activités, et la principale dépense de temps dans les modélisations GEN\_1 et GEN\_2. Le temps de recherche des informations est cette fois séparé en une composante « usuelle » et une composante de recherche dans une BDC, du logiciel KANO. Cette dernière n'est cependant pas très élevée pour deux raisons. La première se justifie par le fait d'avoir les informations contenues dans un silo de connaissance connu, ce qui diminue mécaniquement le temps de recherche. Et la deuxième raison est liée à l'implémentation de l'outil : en tant que « preuve

### 4.3. MISE EN ŒUVRE SUR LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION

---

de concept », il n’y a que très peu d’informations utiles aux concepteurs contenues dans la BDC car elle n’a pas pu être enrichie de connaissances représentatives au préalable. Ces deux éléments justifient donc un temps peu élevé de recherche dans les BDC  $t_{ra}$ . De même, le temps de recherche hors BDC  $t_{rm}$  est réduit par rapport à la situation *as-is*, passant de  $54 \pm 46$  à  $24 \pm 21$  minutes. Ce gain de temps s’explique principalement par un biais expérimental induit par l’ordre de réalisation des activités, les concepteurs ayant majoritairement commencé par l’approche *as-is*. Ils avaient donc mécaniquement besoin de moins d’informations puisqu’ils en avaient déjà acquis lors de la première phase de mesure. Ce biais a été partiellement corrigé a posteriori en incitant les concepteurs à quantifier le temps qu’ils auraient passé sur une première recherche d’information, en considérant les données qu’ils seraient capables de retrouver dans la BDC. Ainsi, l’utilisation de l’outil développé permettrait de faire passer le temps de recherche des informations de  $54 \pm 46$  minutes à  $29 \pm 25$  minutes, ce qui suggère un gain de temps de presque 50 % apporté par l’approche KBE. Concernant les temps de modélisation, l’utilisation du logiciel permet de modéliser une première ligne de transmission en  $29 \pm 9$  minutes au lieu de  $101 \pm 45$  minutes, soit également un gain de temps proche de 50 % sur la modélisation. En revanche, sur une deuxième modélisation, l’outil KBE n’apporte pas de gains significatifs en raison de l’ergonomie du logiciel développé. La modélisation est à réitérer entièrement avec le logiciel tandis que, dans le cas *as-is*, le concepteur peut ne modifier que quelques paramètres sur le modèle existant, ce qui réduit le temps passé sur une deuxième modélisation. Une approche hybride est une perspective intéressante pour profiter d’une première génération rapide du modèle avec l’outil KBE, suivi de quelques modifications directement dans le fichier modèle généré pour étudier d’autres paramètres. En revanche, une telle approche perdrait les bénéfices de la capitalisation de l’outil KBE. Pour le temps passé sur l’analyse, le logiciel traite directement les résultats pour ne renvoyer que les informations utiles au concepteur, ce qui facilite l’analyse et la prise de décision des utilisateurs.

Après l’analyse des valeurs obtenues par expérimentation réalisée, nous pouvons passer au calcul des KPI présentés dans la section 3.3.2. L’analyse de la performance se fait du point de vue du temps, tel que formulé sur les équations de la section 3.3.2, bien qu’elle puisse se faire également en coûts en convertissant le temps à l’aide des TJM. Dans notre cas, nous avons besoin des valeurs suivantes :  $\alpha_1$  est considéré nul pour simplifier l’analyse, dans la mesure où il n’y a pas eu de coûts spécifiques à un des deux processus, et  $\alpha_2$  vaut donc 1. Cela induit également négliger les valeurs  $c_i^{as-is}$  et  $c_i^{to-be}$  qui ne seront donc pas considérées. De même, les constantes  $c_{tjm}$  et  $t_{tjm}$  sont définies comme valant entre 20 et 60 euros pour une heure de travail, mais ne sont pas à prendre en considération lorsqu’ $\alpha_1$  est nul. Ainsi, l’analyse de la performance, à travers le rapport d’efficacité, est déterminé par les valeurs de  $t_i^{as-is}$  et  $t_i^{to-be}$ . Le ratio de performance est analysé en estimant les propriétés du ratio des lois normales de  $t_i^{as-is}$  et  $t_i^{to-be}$ , exprimées à partir de leurs moyennes et écart-types. Les résultats sont rassemblés dans le tableau 4.10, avec l’étude de chaque activité (GEN\_1, CAL\_1, ANA\_1 et GEN\_2) ainsi que l’étude d’un mini-processus d’« étude de concept », composé des quatre activités étudiées auxquelles sont ajoutées CAL\_2 et ANA\_2. Les données utilisées pour ces deux activités sont les mêmes que celles CAL\_1 et ANA\_1 car nous supposons qu’elles sont similaires.

Plusieurs conclusions sont tirées de ces données. Tout d’abord, le plus gros gain d’efficacité est apporté par l’outil pour post-traiter et analyser les résultats du modèle, avec  $767 \pm 1035$  %. L’écart-type est plus important que la moyenne ce qui induit qu’il existe des cas de figure dans lesquels le système KBE ne permet pas de dégager de la performance. Cependant, ces gains de l’ordre de 750 % sont à relativiser comparativement aux ordres de grandeur en jeu. En effet, les durées considérées sont plus

### 4.3. MISE EN ŒUVRE SUR LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION

modestes que celles nécessaires pour générer le premier modèle, ce qui fait que le gain de performance est certes important mais dans une proportion limitée de la durée du processus. Pour appuyer cette analyse, le gain d'efficacité affiché pour deux cycles d'étude de concept de ligne de transmission est proche des gains affichés par la génération du premier modèle lors de l'activité GEN\_1. Enfin, il est remarquable que le logiciel KBE n'apporte finalement pas de gains pour la génération d'un deuxième modèle lors de l'activité GEN\_2, avec une moyenne de -4 % de gains. L'écart-type est, encore une fois, important, ce qui induit en étant proche d'une moyenne nulle qu'il existe environ 50 % des cas où le logiciel apportera un bénéfice par rapport aux outils *as-is*. Finalement, sur les bases de l'analyse de deux cycles d'étude du concept, les gains apportés par le logiciel KANO sont de 164 %, ce qui induit un gain d'efficacité important, avec cependant une variabilité élevée de  $\pm 151$  % qui peut rendre les gains quasi-nuls dans certains cas de figure, et plus important dans d'autres jusqu'à plus de 300 %.

TABLE 4.10 – Quantification du gain d'efficacité apporté par le processus *to-be* pour l'étude du positionnement fréquentiel

	$t_i^{as-is}$	$t_i^{to-be}$	$\Delta N$
<b>Activité</b>	<b>Minutes</b>	<b>Minutes</b>	<b>%</b>
GEN_1	156 $\pm$ 64	58 $\pm$ 27	169 $\pm$ 167
CAL_1	0	0	0
ANA_1	26 $\pm$ 17	3 $\pm$ 1	767 $\pm$ 1035
GEN_2	22 $\pm$ 10	23 $\pm$ 5	-4 $\pm$ 48
Deux cycles « étude du concept »	230 $\pm$ 105	87 $\pm$ 30	164 $\pm$ 151

La même démarche est réalisée pour réaliser un prédimensionnement en contraintes d'un arbre de transmission composite. Les concepteurs ont réalisé les quatre étapes de conception GEN\_1, CAL\_1, ANA\_1 et GEN\_2 pour pouvoir étudier le gain d'efficacité apporté par l'outil développé dans la réalisation de ce processus. Les données issues des expérimentations sont rassemblées dans le tableau 4.11, et sont obtenues par les concepteurs qui ont réalisé des activités de prédimensionnement pour répondre aux spécifications du CdCF présenté précédemment.

TABLE 4.11 – Résultats de l'expérimentation pour les mesures de temps du prédimensionnement en contraintes de l'arbre de transmission composite, exprimées en minutes

<b>Activité</b>	$t_{rm}^{as-is}$	$t_{ra}^{as-is}$	$t_u^{as-is}$	$t_c^{as-is}$	$t_{rm}^{to-be}$	$t_{ra}^{to-be}$	$t_u^{to-be}$	$t_c^{to-be}$
GEN_1	105 $\pm$ 70	-	213 $\pm$ 104	1 $\pm$ 1	43 $\pm$ 41	4 $\pm$ 2	34 $\pm$ 25	< 1
CAL_1	-	-	3 $\pm$ 2	0	-	-	3 $\pm$ 2	< 1
ANA_1	21 $\pm$ 12	-	35 $\pm$ 17	0	0	0	6 $\pm$ 3	< 1
GEN_2	2 $\pm$ 2	-	38 $\pm$ 36	2 $\pm$ 1	0	0	19 $\pm$ 9	< 1

Par analogie avec les résultats obtenus pour le prédimensionnement en fréquences d'une ligne de transmission, les phases des activités les plus chronophages sont la recherche d'information et le temps de réalisation des activités. Par ailleurs, l'activité GEN\_1 est l'étape qui présente la plus longue durée puisque les concepteurs ont dû chercher les informations nécessaires pour générer un premier modèle,

### 4.3. MISE EN ŒUVRE SUR LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION

puis le réaliser. Les temps passés sont plus importants dans l'activité *as-is* que dans l'activité *to-be* pour la recherche d'information et la réalisation du modèle, ce qui induit que l'outil KBE apporte un gain de performance. Cependant, il existe toujours les biais annoncés pour le prédimensionnement en fréquence : le temps de recherche des informations est ajusté entre l'activité *as-is* et l'activité *to-be* pour être équivalent à une première recherche dans les deux cas étudiés, de même que le temps de formation nécessaire pour utiliser l'outil KBE est déduit par rapport à l'utilisation des outils connus pour la réalisation du processus *as-is*. Finalement, nous pouvons observer un gain moyen de 55 % pour le temps de recherche d'informations et une durée de modélisation réduite de 84 %. Les temps de capitalisation, pour les deux processus, sont faibles donc les gains ne sont pas significatifs. En revanche, dans le processus *as-is*, les temps de capitalisation faibles sont induits par une quasi-absence de capitalisation des activités, tandis que les durées relevées pour le processus *to-be* sont le résultat d'une capitalisation rapide dans l'outil KBE. La deuxième activité de modélisation, GEN\_2, est plus rapide que la première activité GEN\_1 pour les deux processus. Cela s'explique par un besoin d'informations réduit lors de la deuxième modélisation, car la majorité a été récupérée dès la première modélisation. De plus, pour les temps de modélisation, l'activité *as-is* est plus rapidement réalisée lors de la deuxième itération car certains concepteurs n'ont fait que modifier le modèle existant pour converger vers une meilleure solution. Puis, en ce qui concerne les temps de calcul CAL\_1, ils sont similaires pour les deux processus puisque les modèles réalisés sont similaires. Enfin, pour les durées des activités d'analyse ANA\_1, les concepteurs réalisent la tâche plus rapidement avec l'outil KBE puisque les méthodes et outils d'analyse sont intégrés au logiciel KBE. Dans le cas *as-is*, les concepteurs doivent identifier les méthodes de dimensionnement et les appliquer, ce qui est plus long, et ce qui explique finalement la différence de temps observée.

Une fois les données des activités récoltées dans le cas du prédimensionnement en contraintes d'un arbre composite, les gains d'efficacité sont calculés et rassemblés dans le tableau 4.12. La démarche et les hypothèses sont les mêmes que pour le prédimensionnement en fréquence de la ligne de transmission.

TABLE 4.12 – Quantification du gain d'efficacité apporté par le processus *to-be* pour l'étude des contraintes de torsion

	$t_i^{\text{as-is}}$	$t_i^{\text{to-be}}$	$\Delta N$
<b>Activité</b>	<b>Minutes</b>	<b>Minutes</b>	<b>%</b>
GEN_1	319 ± 125	81 ± 50	294 ± 288
CAL_1	3 ± 2	3 ± 2	0
ANA_1	56 ± 21	6 ± 3	833 ± 583
GEN_2	42 ± 36	19 ± 9	121 ± 216
Deux cycles « étude du concept »	479 ± 202	118 ± 62	306 ± 273

Toutes les activités du processus *to-be* présentent un gain d'efficacité apporté par l'outil KBE, à l'exception du calcul qui affiche une performance similaire dans les deux cas de figure. Le gain d'efficacité le plus important est pour l'activité d'analyse ANA\_1, tout comme pour les activités orientées sur les fréquences propres, avec 833 % de gain moyen. Ce gain est à mettre en perspective avec la faible durée de l'activité comparée à la première étape de modélisation GEN\_1, six à dix fois plus chronophage. L'activité GEN\_1 dégage un gain d'efficacité moyen de 294 % par l'utilisation d'outils KBE,

### 4.3. MISE EN ŒUVRE SUR LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION

---

mais avec une variabilité élevée qui ne donne pas de gains dans les plus mauvais cas. De même, pour la deuxième étape de modélisation GEN\_2, le gain moyen est positif et de 121 %, mais l'incertitude associée est très élevée et peut induire une perte de performance dans certains cas. Dans l'ensemble, sur deux cycles d'analyse, la performance est de  $306 \pm 273$  %, ce qui donne un gain d'efficacité positif, donc un gain de performance, mais les résultats sont également associés à une grande variabilité pouvant entraîner des pertes de performances. Ces écarts sont causés par les différences dans les résultats mesurés par les expérimentateurs, sans que cela ne remette en cause en pertinence de l'indicateur. En effet, comme expliqué en section 4.2.4, ces résultats sont le fruit d'une modélisation des résultats par une loi normale (moyenne et écart-type) et qui montre des limites pour représenter des résultats qui peuvent parfois être hétérogènes et variables sur les valeurs relevées. Nous aurons l'occasion de revenir sur cette limite, mais une solution est d'utiliser des lois de distribution non-symétriques (ou « grosse queue ») et strictement positive pour représenter des durées par exemple.

Finalement, l'outil KBE utilisé pour réaliser deux processus de prédimensionnement (en fréquences et en contraintes) a été évalué au moyen d'un KPI de mesure de la performance proposé au chapitre 3. Cet indicateur identifie des gains de  $164 \pm 151$  % pour le prédimensionnement en fréquences et de  $306 \pm 273$  % pour le prédimensionnement en contraintes. Ces gains de performance sont très importants, entre 164 et 306 % en moyenne, mais sont à considérer au regard d'incertitudes élevées avec des écarts-types de 151 et 273 % respectivement. Ainsi, les systèmes KBE sont capables d'apporter beaucoup de performance aux concepteurs dans le cadre des processus de prédimensionnement, mais l'utilisation de ces outils intègre une composante situationnelle qui les rend très efficaces dans certains cas, et beaucoup moins dans d'autres cas. La démarche proposée démontre l'utilisation du KPI de gain d'efficacité  $\Delta N$  sur des cas applicatifs industriels concrets, et valide ainsi la capacité du système de mesure proposé à mesurer la performance des activités métier. Le système de mesure est également capable de quantifier la performance apportée par l'intégration d'outils KBE dans le PDP industriel. Une fois l'analyse réalisée sur quelques activités du processus de prédimensionnement, l'exercice du calcul du gain d'efficacité est étendu au processus de prédimensionnement dans son ensemble.

#### 4.3.3 Extension des résultats à l'échelle du processus de prédimensionnement

La réalisation d'un processus de prédimensionnement complet requiert trop de temps pour pouvoir être mesurée par les équipes BE de Nexteam Group. De plus, le PDP contiendrait beaucoup plus que deux activités de prédimensionnement pour couvrir l'ensemble du spectre des activités réalisées lors d'un PDP industriel. Pour estimer les gains apportés par des outils KBE, le nombre et les durées de chaque activité sont estimés par les concepteurs pour extrapoler les résultats à l'échelle du processus. Le processus de prédimensionnement est composé des activités du tableau 4.2 en différents nombres. Les concepteurs ont donc estimé les durées minimums, moyennes et maximums de chaque activité, pour un processus *as-is* (usuel) et pour un processus *to-be* (intégrant les outils KBE). Les durées moyennes et leur écart-type sont rassemblés dans le tableau 4.13.

Concernant le processus *as-is*, les concepteurs estiment qu'il faut en moyenne 8 réalisations d'activités de génération de modèle (GEN\_E et GEN\_O) et autant pour les calculer (CAL\_E et CAL\_O). Le nombre d'activités d'analyse (ANA\_E et ANA\_O) est plus important puisque les concepteurs analysent

### 4.3. MISE EN ŒUVRE SUR LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION

---

les données d'autres outils d'ingénierie qui ne nécessitent pas de générer et de calculer des modèles. Les concepteurs estiment qu'il y a un nombre proche d'activités réalisées pour la phase d'étude du concept et celle de l'optimisation, avec respectivement huit activités pour la génération du modèle et son calcul, et une douzaine d'activités d'analyse. En fonction du nombre de concepts étudiés ou des analyses effectuées, le nombre de livrables peut varier mais reste en faible quantité, estimé à trois en moyenne. Concernant le processus *to-be*, les concepteurs ont estimé que l'utilisation d'outils KBE accélère les phases de modélisation des concepts, ce qui conduit à en générer plus pour explorer l'espace des solutions. Cela induit une moyenne d'activité de douze, plus élevée que pour le processus *as-is*. De même, c'est durant l'activité d'étude du concept que l'espace des solutions est le plus exploré, et donc le nombre d'activités moyen diminue légèrement lors de l'activité d'optimisation. Enfin, la rédaction des livrables n'est pas influencée par l'utilisation d'outils KBE, donc il n'y a pas de différence notable entre le processus *as-is* et *to-be*.

TABLE 4.13 – Estimation du nombre d'activités à réaliser pour un processus de prédimensionnement complet

Activité	Processus <i>as-is</i>	Processus <i>to-be</i>
GEN_E	8 ± 7	12 ± 17
CAL_E	8 ± 7	12 ± 17
ANA_E	12 ± 8	15 ± 15
GEN_O	8 ± 7	9 ± 12
CAL_O	8 ± 7	9 ± 12
ANA_O	12 ± 8	12 ± 13
RED_L	3 ± 2	3 ± 2

Afin de réaliser l'analyse d'un processus complet, les durées de recherche d'information  $t_r$ , de réalisation  $t_u$  et de capitalisation  $t_c$  de chaque activité sont estimées par les concepteurs, et rassemblées dans le tableau 4.14. Les valeurs des activités de l'étude des concepts GEN\_E, CAL\_E et ANA\_E sont extrapolées par rapport aux expérimentations réalisées sur les prédimensionnements en fréquences et en contraintes ainsi que par retour d'expérience. Les valeurs des activités d'optimisation et de rédaction des livrables GEN\_O, CAL\_O, ANA\_O et RED\_L sont uniquement estimées par retour d'expérience des concepteurs.

Pour les activités de calcul, CAL\_E et CAL\_O, les seules différences sont sur les durées de capitalisation. Les outils KBE améliorent le processus de capitalisation et donc la durée  $t_c$  est en moyenne plus faible pour les activités *to-be* par rapport aux activités *as-is*. L'écart-type plus important, supérieur d'environ 200 % à la moyenne, traduit une grande disparité dans les résultats avec des temps de capitalisation qui peuvent fortement varier autour du temps moyen. Les activités de modélisation GEN\_E et GEN\_O montrent toutes les deux des gains de temps en moyenne avec les outils KBE, que ce soit pour les recherches d'informations, les temps de modélisation ou les temps de capitalisation. Les durées de GEN\_E, sauf pour la capitalisation, sont également plus importantes que celles de GEN\_O. Cela s'explique par le fait que les informations sont en plus grandes parties obtenues lors des activités précédentes, et que les concepteurs savent ce qui est attendu en termes de modélisation. Les mêmes tendances sont observées pour les activités d'analyse ANA\_E et ANA\_O, ce qui s'explique par les

### 4.3. MISE EN ŒUVRE SUR LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION

mêmes raisons. Enfin, l'activité de rédaction des livrables présente pour seule différence le temps de recherche d'informations, qui peut être réduit par l'utilisation de l'outil KBE. En effet, si les données recherchées sont majoritairement concentrées dans une BDC, la recherche des informations est facilitée par sa consultation.

Les valeurs des écarts-types sont très importantes comparativement aux moyennes obtenues. C'est le résultat de la prise en considération des valeurs extrêmes pour les différentes durées estimées par les concepteurs. En effet, la durée moyenne d'une modélisation est de 180 minutes mais les durées maximums peuvent excéder plus de 600 minutes pour des modèles plus complexes. Ces valeurs extrêmes induisent donc une très forte oscillation autour de la moyenne.

TABLE 4.14 – Estimation des durées des activités pour un processus de prédimensionnement complet, exprimées en minutes

	Durée	Processus <i>as-is</i>	Processus <i>to-be</i>	Variation moyenne
GEN_E	$t_r$	121 ± 96	77 ± 84	-36 %
	$t_u$	234 ± 228	174 ± 258	-26 %
	$t_c$	19 ± 25	7 ± 15	-64 %
CAL_E	$t_r$	0	0	0 %
	$t_u$	73 ± 96	73 ± 96	0 %
	$t_c$	7 ± 20	5 ± 15	-25 %
ANA_E	$t_r$	52 ± 81	42 ± 71	-20 %
	$t_u$	51 ± 52	45 ± 43	-13 %
	$t_c$	6 ± 15	5 ± 15	-6 %
GEN_O	$t_r$	71 ± 106	56 ± 93	-21 %
	$t_u$	199 ± 247	164 ± 264	-18 %
	$t_c$	9 ± 20	7 ± 15	-24 %
CAL_O	$t_r$	0	0	0 %
	$t_u$	77 ± 95	77 ± 95	0 %
	$t_c$	7 ± 20	5 ± 15	-25 %
ANA_O	$t_r$	52 ± 81	42 ± 71	-20 %
	$t_u$	61 ± 52	43 ± 43	-30 %
	$t_c$	6 ± 15	5 ± 15	-6 %
RED_L	$t_r$	79 ± 108	72 ± 102	-8 %
	$t_u$	0	0	0 %
	$t_c$	292 ± 206	292 ± 206	0 %

Toutes les données sont définies pour estimer l'évolution de la performance de chaque activité, à travers la variation d'efficacité. Une fois la durée de chaque activité (GEN\_E, CAL\_E, etc...) calculée, la performance est évaluée pour l'ensemble du processus de prédimensionnement. Le gain d'efficacité est calculé avec le KPI proposé au chapitre 3, section 3.3.2, et suit la même démarche que pour la sous-section précédente sur l'évaluation de la performance des activités. Pour rappel du périmètre de cette analyse fait en section 4.3.2, nous considérons uniquement les durées pour calculer le gain d'efficacité, sans tenir compte des coûts.

### 4.3. MISE EN ŒUVRE SUR LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION

Le tableau 4.15 fait la synthèse de la durée totale  $t_i$  pour les processus *as-is* et *to-be*. Ces durées servent de données initiales pour le calcul du gain d'efficacité par la division des durées *as-is* par les durées *to-be*. Les durées de chaque activité sont calculées dans trois cas de figure. Le premier cas est le processus initial, le processus *as-is*. Le deuxième cas est le processus qui intègre des systèmes KBE, le processus *to-be*, pour lequel une hypothèse est faite sur le nombre d'activités qui augmente pour avoir une meilleure exploration de l'espace des solutions. Enfin, le troisième cas est également un processus *to-be*, mais cette fois en considérant que les concepteurs restent sur un nombre d'activités identique au processus *as-is*. En d'autres termes, le gain de temps apporté a priori par l'utilisation de systèmes KBE ne serait pas réinvesti sur d'autres activités.

TABLE 4.15 – Estimation du gain d'efficacité pour chaque étape du processus et pour le processus de prédimensionnement complet

Activité	Référence	Nombre d'activités augmente		Nombre d'activités constant	
	$t_i^{as-is}$ Minutes	$t_i^{to-be}$ Minutes	$\Delta N$ %	$t_i^{to-be}$ Minutes	$\Delta N$ %
GEN_E	2992 ± 3720	3096 ± 7156	-3 ± 882	2064 ± 3407	45 ± 9291
CAL_E	640 ± 1183	936 ± 2418	-32 ± 100046	624 ± 1168	3 ± 675
ANA_E	1308 ± 1654	1380 ± 2260	-5 ± 1079	1104 ± 1422	18 ± 3335
GEN_O	2232 ± 3467	2043 ± 5010	9 ± 2685	1816 ± 3377	23 ± 5551
CAL_O	672 ± 1188	738 ± 1746	-9 ± 2641	656 ± 1172	2 ± 613
ANA_O	1428 ± 1697	1080 ± 1896	32 ± 6832	1080 ± 1414	32 ± 5697
RED_L	1113 ± 1120	1092 ± 1103	2 ± 274	1092 ± 1103	2 ± 274
Processus prédim.	10385 ± 5962	10365 ± 9753	0.2 ± 110	8436 ± 5567	23.1 ± 108

Pour le cas où le nombre d'activités augmente, les gains d'efficacité obtenus pour chaque activité sont variables, allant de -32 % pour CAL\_E à +32 % pour ANA\_O. Trois activités, GEN\_O, ANA\_O et RED\_L, présentent un gain moyen supérieur à 0. Ce gain semble justifié par le fait de générer plus rapidement des modèles pour un nombre d'activités GEN\_O similaires entre les processus *as-is* et *to-be*. De même, pour les étapes d'analyse du concept GEN\_O, les outils KBE apportent des bénéfices en moyenne d'après les estimations des concepteurs, même si les écarts-types sont très supérieurs aux moyennes, traduisant la grande variabilité des durées totales de réalisation des activités. Enfin, le dernier gain d'efficacité positif est pour la rédaction des livrables RED\_L, dont le gain moyen est obtenu grâce à la recherche des informations qui est facilitée par l'accès aux BDC de l'outil KBE.

Les autres activités, GEN\_E, CAL\_E, ANA\_E et CAL\_O affichent des gains moyens négatifs. Les pertes de performance affichées par les activités GEN\_E et ANA\_E sont proches de 0 (respectivement -3 % et -5 %), ce qui est expliqué par le fait de faire plus d'activités dans le processus *to-be* avec des outils qui améliorent la performance unitaire de chaque activité. Le calcul CAL\_E affiche une grosse perte de performance, de -32 %, causée par l'augmentation du nombre d'activités de calcul dans le processus *to-be*, et le temps de réalisation de cette activité est incompressible et n'est pas affecté par l'outil KBE. Cette perte de performance est réduite pour l'activité de calcul GEN\_O puisque les nombres d'activités entre les processus *as-is* et *to-be* se rapprochent.

### 4.3. MISE EN ŒUVRE SUR LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION

---

Finalement, le gain d'efficience moyen affiché par le processus de prédimensionnement complet est de 0.2 %, soit une absence de gain notable. En revanche, la variabilité importante, de  $\pm 110\%$ , induit que les performances finales de chaque processus de prédimensionnement peuvent basculer en gains ou en pertes en fonction des activités réalisées. Si les activités sont réalisées avec les outils KBE développés à cet effet et que le nombre d'activités à réaliser avant de converger vers une solution optimale reste contenu, alors le processus *to-be* offrira un gain de performance. Cependant, si le nombre d'activités pour explorer l'espace des solutions augmente, alors la performance entre les deux processus devient nulle en moyenne. Et enfin, si le nombre d'activités augmente fortement, et que les outils KBE ne sont pas des ressources adaptées à la réalisation des activités, alors la performance reste neutre ou diminue.

Pour le cas d'étude où le nombre d'activités reste constant, les gains d'efficience moyens sont tous positifs, et compris entre 2 et 45 %. Les principaux gains apparaissent là où les systèmes KBE sont appliqués, soient les activités de génération de modèles et d'analyse. Le gain le plus significatif est pour la génération des premiers modèles, lors de l'activité GEN\_E, puisque c'est à cette étape que les concepteurs prennent le plus de temps pour construire les premiers modèles des premières analyses. Comme pour l'étude du processus où le nombre d'activités augmente, les écarts-types sont très élevés et traduisent une grande disparité dans les processus réalisés (nouveau projet pour lequel il n'y a pas d'outil à disposition, produit qui présente une spécificité technique non prise en compte par les systèmes KBE, etc...). Le gain est moins important, de 23 % en moyenne, pour la modélisation lors des étapes d'optimisation (GEN\_O). Cela s'explique par le besoin de modéliser des éléments plus précis et spécifiques que les systèmes KBE ne seraient pas capables de réaliser avec un ROI de développement intéressant, et donc les tâches sont réalisées avec les outils usuels plutôt qu'avec les systèmes KBE.

Avec les données estimées par les concepteurs, le gain d'efficience moyen obtenu pour l'ensemble du processus de prédimensionnement est nul pour le processus *to-be* où le nombre d'activités est susceptible d'augmenter, et il est en moyenne de 23 % à nombre d'activités constant. Les variabilités importantes à l'échelle des activités et du processus induisent que des gains de performance sont possibles en fonction des PDP réellement réalisés, mais dont le détail n'est pas capturé par le système de mesure proposé dans ces travaux. De plus, la variabilité calculée est très importante et ne permet pas de capturer des tendances avec certitude, puisque les résultats peuvent refléter à la fois de gros gains de performance comme des pertes importantes. Cette variabilité importante est causée par les durées extrêmes (minimums et maximums) estimées par les concepteurs. Une perspective pour poursuivre l'étude du processus serait d'utiliser des distributions de probabilités avec des lois strictement positives et asymétriques. Cela représenterait plus fidèlement les durées ainsi que la variabilité autour des valeurs moyennes, tout en empêchant les durées d'être négatives lorsque les moyennes sont assorties d'écarts-types élevés.

Après avoir analysé la performance de quelques activités de prédimensionnement à la précédente sous-section, puis la performance du processus de prédimensionnement complet dans cette sous-section, la prochaine présente l'utilisation des KPI proposés pour évaluer les ressources utilisées durant le processus métier. Cela comprend l'étude du ROI des outils KBE développés, ainsi que l'étude de leur complexité d'intégration dans le processus métier.

#### 4.3.4 Mesure du ROI et de la complexité d'intégration dans le processus métier des outils KBE

Cette sous-section a pour objectif de démontrer l'usage et l'intérêt des KPI présentés au précédent chapitre, à la section 3.3.1. Les deux indicateurs en question sont le calcul du ROI de l'automatisation d'un outil, proposé par Van der Velden et al. [22] et intégré à notre proposition de système de mesure, couplé à l'indice de complexité d'intégration proposé. Ces KPI sont illustrés avec les activités de conception de Nexteam Group pour lesquelles un outil métier KBE a été développé. Les deux activités concernées ont été présentées dans le chapitre 1, et aident à réaliser le prédimensionnement en fréquences d'une ligne de transmission et le prédimensionnement en torsion d'un arbre composite.

Le premier point de vérification concerne l'évaluation du ROI du développement d'un outil métier automatisé pour l'étude du positionnement fréquentiel. Pour cela, trois paramètres sont relevés pour quantifier l'indicateur en fonction du nombre d'utilisations présumées : le temps de réalisation manuel de l'activité  $T_M$ , le temps de réalisation automatisé de l'activité  $T_A$  et le temps de développement de l'outil automatisé  $T_D$ . Les valeurs des deux premiers paramètres sont obtenues à partir des expérimentations que les concepteurs ont réalisées, dont les données sont rassemblées dans les tableaux 4.9 et 4.10. Pour la quantification de  $T_D$ , les estimations des temps de développement ont été formulées lors de la présentation du logiciel KANO en section 4.1. Le temps de développement est estimé à 155 heures, en négligeant la première tentative de développement par une personne inexpérimentée, auxquelles sont ajoutées les heures de développement des outils métier, soit 45 et 55 heures respectivement pour le calcul des fréquences d'une ligne de transmission et le calcul des contraintes de torsion d'un arbre. L'incertitude est estimée à 25 heures pour les diverses corrections de bugs et réglages du logiciel.

Comme la génération du modèle représente la majorité du coût en temps du processus, l'outil du système KBE est essentiellement développé pour améliorer la performance de cette activité, même s'il aide également à améliorer la performance de l'analyse des résultats et de la recherche d'informations. Le calcul du ROI se concentre donc sur les activités de génération des modèles, ainsi que sur deux cycles complets de prédimensionnement, comme cela a été fait sur l'analyse des activités métier en sous-section 4.3.2. Les données des paramètres sont synthétisées dans le tableau 4.16, puis les valeurs du ROI sont estimées pour différentes valeurs du paramètre  $n$ , soit le nombre de réalisations de la tâche à l'aide de l'outil automatisé. Les valeurs utilisées sont d'abord uniquement celles du temps de réalisation de l'activité  $t_u$ , puis ensuite le temps total de l'activité  $t_i$ .

La première information qui ressort des données du tableau 4.16 est le faible ROI de l'activité GEN\_2. Cela s'explique par le fait que les concepteurs vont souvent modifier le premier modèle généré, si c'est possible en ne touchant pas à la définition géométrique ni au maillage. Comme les modifications sont très rapides, les gains apportés par l'utilisation d'un outil métier pour générer des modèles diminuent fortement. En revanche, si les concepteurs avaient opté pour une deuxième modélisation qui nécessite un changement de géométrie, alors l'outil aurait présenté un intérêt et un meilleur ROI. L'activité GEN\_1 illustre en ce sens les gains qu'apporte l'outil KBE, puisque le ROI dépasse le seuil de rentabilité autour des 180 itérations (dans le cas où seule la modélisation est considérée, donc la colonne  $t_u$ , sinon ce nombre diminue à 115 pour l'ensemble de la durée l'activité  $t_i$ ), là où dans le cas de GEN\_2 il faudrait plus de 800 itérations. Pour mettre en perspective ces 180 itérations, nous pouvons considérer le nombre de réalisations d'activités de modélisation dans le processus *to-be*, for-

### 4.3. MISE EN ŒUVRE SUR LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION

mulées dans le tableau 4.13. Les données sont de  $12 \pm 17$  activités GEN\_E et  $9 \pm 12$  activités GEN\_O, soit en moyenne  $21 \pm 21$  activités. Il n'est pas possible de prédimensionner un produit en réalisant un faible nombre d'activités de modélisation, arbitrairement choisi inférieur à 5 par exemple, mais il est possible d'en réaliser un grand nombre avec des études paramétriques ou de sensibilités. Dans ces conditions, les 180 itérations sont atteignables en 18 projets en moyenne si nous considérons que la moitié des activités de modélisation sont pour l'étude du positionnement fréquentiel, et ce nombre peut diminuer si les études sont poussées pour exploiter au maximum l'outil à disposition. Enfin, lorsque les deux premiers cycles de prédimensionnement sont considérés, le ROI augmente encore car l'outil permet d'une part d'accélérer l'analyse des calculs EF, et d'autre part de rechercher plus rapidement les informations. La considération de deux cycles complets fait descendre le seuil de rentabilité à 120 et 90 activités, respectivement en considérant uniquement la modélisation ( $t_u$ ) ou l'ensemble des étapes de recherche, de modélisation et de capitalisation ( $t_i$ ) des activités.

TABLE 4.16 – Analyse du ROI de l'automatisation de l'activité de génération de modèle pour le prédimensionnement en fréquences d'une ligne de transmission

Paramètre	GEN_1		GEN_2		Deux cycles	
	$t_u$	$t_i$	$t_u$	$t_i$	$t_u$	$t_i$
$T_M$ (min)	$101 \pm 45$	$156 \pm 64$	$21 \pm 10$	$22 \pm 10$	$154 \pm 48$	$230 \pm 105$
$T_D$ (min)	$12000 \pm 1500$		$12000 \pm 1500$		$12000 \pm 1500$	
$T_A$ (min)	$29 \pm 9$	$58 \pm 27$	$23 \pm 5$	$23 \pm 5$	$58 \pm 10$	$87 \pm 30$
ROI ( $n = 50$ )	$0.36 \pm 0.15$	$0.51 \pm 0.19$	$0.07 \pm 0.03$	$0.07 \pm 0.03$	$0.51 \pm 0.16$	$0.68 \pm 0.28$
ROI ( $n = 100$ )	$0.67 \pm 0.28$	$0.88 \pm 0.36$	$0.13 \pm 0.05$	$0.14 \pm 0.06$	$0.85 \pm 0.26$	$1.12 \pm 0.49$
ROI ( $n = 250$ )	$1.31 \pm 0.55$	$1.46 \pm 0.63$	$0.29 \pm 0.12$	$0.30 \pm 0.12$	$1.43 \pm 0.44$	$1.68 \pm 0.74$

L'analyse du ROI est complétée avec l'indicateur de complexité d'intégration de l'outil. Pour rappel, ce KPI nécessite quatre paramètres pour être calculé : le temps de développement ou d'implémentation de l'outil TD, le temps d'utilisation de l'outil TU, le prérequis en termes de formations et d'expérience pour savoir utiliser l'outil EXP et le temps masqué utilisé par l'outil TC. Trois de ces paramètres sont obtenus par les données des tableaux 4.9 et 4.10, soit les valeurs de TD, TU et TC. Le premier correspond au temps de développement de l'outil KBE, le deuxième au temps passé sur les activités de modélisation, principalement GEN\_1, et enfin le dernier est le temps de calcul du modèle réalisé sur l'activité CAL\_1. Ces durées sont converties en un coefficient grâce à la table définie dans le tableau 3.1, et sont ensuite reportées dans le tableau 4.17. Ce tableau compare deux outils utilisés dans le processus *as-is*, avec deux outils du processus *to-be* dont l'un est développé dans le logiciel KANO et l'autre demeure théorique. L'outil KBE développé pour modéliser la ligne en EF 1D est modulaire, et plus de détails ont été présentés au début de ce chapitre. L'outil EF 2D/3D du processus *to-be*, qui n'a pas été développé, est envisagé théoriquement comme une banque de modèles EF 2D/3D, paramétriques ou non, qui pourraient s'assembler de façon à constituer la ligne de transmission souhaitée. Cette solution n'a pas été implémentée en raison de la difficulté du développement couplée aux incertitudes sur les possibilités d'utilisation de l'outil, qui pourrait être trop spécifique à certaines modélisations.

### 4.3. MISE EN ŒUVRE SUR LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION

TABLE 4.17 – Comparaison de la complexité d’intégration entre les outils actuels et l’outil KBE développé pour le calcul des fréquences

Paramètre	Notation	Processus <i>as-is</i>		Processus <i>to-be</i>	
		EF 1D	EF 2D/3D*	EF 1D	EF 2D/3D*
Temps de développement	TD	1	1	7-8	9-10
Temps d’utilisation	TU	2-4	7-9	1-2	2-7
Besoin d’expérience	EXP	4-6	5-7	2-3	2-5
Temps masqué	TC	1	3-5	1	3-5
Complexité d’intégration	C	0.17-0.23	0.33-0.43	0.32-0.35	0.47-0.70

\* : données estimées par retour d’expérience

Le premier constat qui est tiré du tableau 4.17 est que l’outil majoritairement utilisé dans le processus métier, la modélisation par EF 2D et 3D, n’est pas le plus simple à intégrer et utiliser. Cette approche est majoritairement utilisée en raison des modèles CAO des différents composants qui sont toujours modélisés par les concepteurs, et qui sont alors utilisés par les calculateurs pour réaliser les calculs d’ingénierie. L’indicateur nous renseigne sur une complexité modérée des modélisations EF 2D/3D, soit entre 0.33 et 0.43, alors que d’autres outils à la complexité plus faible sont envisageables. C’est le cas des modélisations par EF 1D, qui s’intègrent bien dans le processus métier avec un score compris entre 0.17 et 0.23 dans la version « manuelle » (non-KBE), et entre 0.32 et 0.35 pour la version KBE. Ainsi, utiliser un outil métier automatisé ou continuer à utiliser l’outil métier usuel représente, dans ce cas-là, une complexité équivalente. La principale différence réside dans le fait que l’outil *as-is* n’apportera pas de bénéfices à long terme, contrairement à l’outil KBE, puisque le coût de développement sera compensé par une utilisation plus rapide. Cependant, si la modélisation par EF 2D/3D avait dû être automatisée, la complexité d’intégration augmente à des seuils élevés, entre 0.47 et 0.70. Le temps nécessaire pour développer un tel outil, couplé à la difficulté élevée, donne une rentabilité de l’outil atteinte pour un nombre d’itérations très important, supérieur à 1000, mais dont le détail du calcul n’est pas présenté.

Un autre avantage des outils KBE, en plus de la réduction du temps de modélisation TU, est la réduction du besoin en formation des utilisateurs. Cet avantage est plus visible sur les outils EF 1D, qui ont été implémentés, plutôt qu’avec l’outil théorique de modélisation par EF 2D/3D. En effet, à chaque besoin de nouveaux composants dans la ligne de transmission, une étape préalable de modélisation CAO et EF devra être réalisée, ce qui annule les gains apportés par l’automatisation de la modélisation de la ligne de transmission. La combinaison d’un temps de développement TD et d’un temps d’utilisation TU élevés rendent l’outil difficile à intégrer au processus métier, ce qui se traduit par un coefficient pouvant excéder le seuil de 0.60 (jusqu’à 0.70 dans notre cas).

Nous avons précédemment évoqué les KPI à propos de la fidélité des modélisations EF 2D/3D par rapport à leur équivalent en EF 1D, du fait d’une meilleure représentation géométrique et des conditions aux limites. Mais cette fidélité est aussi à mettre en relation avec la maturité du projet (étude de l’espace des solutions ou optimisation d’un produit) et les durées d’implémentation. Il est donc pertinent d’avoir un outil automatisé capable d’explorer l’espace des solutions à moindre coût, en contrepartie d’une incertitude plus élevée sur les résultats obtenus. Dans notre cas d’étude, le choix de développer un outil KBE de modélisation de ligne de transmission en EF 1D est conforté par

### 4.3. MISE EN ŒUVRE SUR LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION

les résultats des indicateurs de complexité d'intégration et de calcul de ROI, avec une augmentation contenue pour le premier et des bénéfices sur du long terme pour le deuxième.

La même démarche globale est réalisée pour l'outil de calcul des contraintes de torsion d'un arbre composite. Le ROI est tout d'abord calculé avant d'être mis en relation avec le calcul de la complexité d'intégration dans le processus métier. Pour quantifier le ROI lié à l'automatisé de l'activité métier, les données des tableaux 4.11 et 4.12 sont compilées dans le tableau 4.18 pour définir les valeurs des paramètres  $T_M$ ,  $T_D$  et  $T_A$ . Les ROI sont ensuite quantifiés pour différentes valeurs du paramètre  $n$ .

TABLE 4.18 – Analyse du ROI de l'automatisation de l'activité de génération de modèle pour le prédimensionnement en contraintes de torsion d'un arbre de transmission composite

Paramètre	GEN_1		GEN_2		Deux cycles	
	$t_u$	$t_i$	$t_u$	$t_i$	$t_u$	$t_i$
$T_M$ (min)	213 ± 104	319 ± 125	38 ± 36	42 ± 36	327 ± 112	479 ± 202
$T_D$ (min)	12600 ± 1500		12600 ± 1500		12600 ± 1500	
$T_A$ (min)	34 ± 25	81 ± 50	19 ± 9	19 ± 9	71 ± 27	118 ± 62
ROI ( $n = 50$ )	0.72 ± 0.74	0.96 ± 0.38	0.13 ± 0.07	0.14 ± 0.07	1.00 ± 0.34	1.30 ± 0.55
ROI ( $n = 100$ )	1.33 ± 0.60	1.53 ± 0.63	0.28 ± 0.15	0.30 ± 0.16	1.65 ± 0.58	1.95 ± 0.85
ROI ( $n = 250$ )	2.52 ± 1.22	2.42 ± 1.12	0.54 ± 0.29	0.62 ± 0.33	2.69 ± 1.01	2.83 ± 1.33

Les ROI pour cet outil métier suivent la même tendance et répartition que pour l'outil métier de calcul des fréquences. L'activité GEN\_2 présente les plus faibles valeurs puisque les concepteurs réalisent principalement des modifications de modèles lors de la deuxième itération, ce qui limite l'intérêt d'un outil génératif. Le seuil de rentabilité n'est atteint qu'autour des 500 itérations, ce qui reste conséquent à l'échelle du nombre de projets car proche des 50 projets. En revanche, dès lors que la première modélisation est considérée, le seuil de rentabilité est atteint plus rapidement, entre 65 et 75 itérations. Enfin, le développement de l'outil métier est rentabilisé dès une cinquantaine d'utilisations lorsqu'elles sont considérées à l'échelle du cycle de prédimensionnement complet. L'outil développé pour le calcul des contraintes de torsion est plus intéressant que l'outil pour l'analyse des fréquences puisqu'il offre un meilleur ROI à l'échelle du cycle de prédimensionnement, mais cela est à mettre en perspective avec deux éléments. Tout d'abord, l'outil d'étude des fréquences des lignes de transmission est modulaire, ce qui signifie qu'il est capable d'explorer un espace des solutions plus large que l'outil de calcul des contraintes, et ensuite l'activité de calcul des contraintes requiert en moyenne deux fois plus de temps à être réalisée. Les bénéfices se ressentent donc dans l'utilisation d'un outil capable de générer rapidement des modèles numériques complexes.

L'analyse du ROI du système KBE est mise en contexte avec l'indicateur de complexité d'intégration. Pour cela, les données des tableaux 4.11 et 4.12 sont de nouveau utilisées pour extraire les paramètres TD, TU et TC. Le paramètre EXP est quant à lui estimé par retour d'expérience. Les données des paramètres, pour l'outil métier *as-is* et l'outil métier KBE développé sont rassemblées dans le tableau 4.19. Les deux outils métier ont le même objectif de modélisation d'un arbre de transmission composite, modélisé à l'aide d'EF 2D, mais l'un est réalisé à la main (*as-is*) et l'autre est automatisé dans un système KBE (*to-be*).

### 4.3. MISE EN ŒUVRE SUR LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION

Les données du tableau 4.19 indiquent que l’outil KBE est plus difficile à intégrer au processus métier : 0.35 à 0.45 pour l’outil KBE contre 0.23 à 0.30 pour l’outil manuel. Cela est justifié par le coût de développement élevé de 7 à 8, soit entre un et six mois de développement. Comme pour les outils de calcul des fréquences, la différence réside dans le fait que le système KBE va être rentabilisé après un certain nombre d’opérations tandis que l’utilisation usuelle n’offre pas de bénéfices à long terme. En plus de la réduction de temps de modélisation, l’outil KBE réduit le besoin en expérience de l’utilisateur, ce qui facilite l’utilisation de l’outil par des concepteurs moins expérimentés.

TABLE 4.19 – Comparaison de la complexité d’intégration entre l’outil actuel et l’outil KBE développé pour le calcul des contraintes

		<b>Processus <i>as-is</i></b>	<b>Processus <i>to-be</i></b>
<b>Paramètre</b>	<b>Notation</b>	<b>EF 2D</b>	<b>EF 2D</b>
Temps de développement	TD	1	7-8
Temps d’utilisation	TU	4-5	1-2
Besoin d’expérience	EXP	4-5	2-3
Temps masqué	TC	2-3	2-3
Complexité d’intégration	C	0.23-0.30	0.35-0.45

Finalement, nous pouvons constater que les systèmes KBE implémentés ont une complexité d’intégration plus élevée que leur équivalent manuel, mais qui reste autour du seuil « modéré » d’après le tableau 3.2. De plus, il semble justifié de développer un outil légèrement plus difficile à déployer pour obtenir un bénéfice à long terme grâce à des ROI proches d’une centaine d’utilisations, ce qui peut être réalisé entre quelques unités et quelques dizaines de projets.

#### 4.3.5 Estimation du ROI du processus de capitalisation

L’objectif est d’estimer l’intérêt et les gains futurs que va apporter un système de capitalisation et de gestion des connaissances. Pour cela, un KPI de ROI a été proposé au chapitre 3, à la section 3.3.3. Pour rappel, l’indicateur est composé des paramètres du temps de développement de la solution de capitalisation et gestion des connaissances  $T_{Dev}$ , du temps de recherche des informations « manuellement »  $T_{Rech\_manuelle}$ , soit en dehors d’une BDC, du temps passé à capitaliser les connaissances  $T_{Cap}$ , du temps de recherche des informations dans la BDC  $T_{Rech\_bdc}$  et enfin de la probabilité de trouver les informations dans la BDC  $p$ . Il y a, de plus, un paramètre  $n$  qui quantifie le nombre de recherches à effectuer.

Dans le tableau 4.20, le temps de développement du système de capitalisation  $T_{Dev}$  est estimé à partir du temps nécessaire pour créer un outil minimal, soit environ un mois de travail. Le temps de recherche usuel  $T_{Rech\_manuelle}$  est estimé à partir des données récoltées dans le tableau 4.14, en considérant la moyenne des temps de recherche  $t_r$ , en intégrant ou non l’étape de rédaction des livrables. La probabilité  $p$  de trouver l’information dans la BDC est estimée en fonction des chances de trouver dans une BDC structurée autour du MM présenté en figure 3.4. Cette probabilité est estimée à 50 %, car bien que le MM capture une image complète des activités, il y a toujours un besoin de nouvelles

### 4.3. MISE EN ŒUVRE SUR LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION

données en fonction de nouveaux cas de figure et de nouvelles spécifications qui n’avaient jamais été observées. De plus, cette probabilité va varier à mesure que le système est utilisé, puisque de plus en plus de données vont enrichir les BDC. Viennent ensuite le temps de recherche dans la BDC  $T_{Rech\_bdc}$  et le temps de capitalisation  $T_{Cap}$ . Le premier est estimé à quelques minutes, fixé à 5 minutes, par estimation du temps de recherche dans la BDC KANO. Enfin, le deuxième est estimé par la combinaison des moyennes pondérées avec le nombre d’activités du tableau 4.13 des temps de capitalisation  $t_c$  du tableau 4.14, entre le processus *as-is* avec une probabilité  $p$ , et celle du processus *to-be* avec une probabilité  $1 - p$ .

TABLE 4.20 – Estimation des paramètres du ROI de la capitalisation des connaissances pour le processus de prédimensionnement, en étudiant sans et avec l’étape de rédaction des livrables

Grandeur	Unité	Hors livrables	Avec livrables
$T_{Dev}$	Minutes	10000	10000
$T_{Rech\_manuelle}$	Minutes	50	51
$T_{Cap}$	Minutes	7	20
$T_{Rech\_bdc}$	Minutes	5	5
$p$	-	0.5	0.5

D’après les données du tableau 4.20, le fait de considérer la rédaction des livrables, qui est une activité de capitalisation pure, augmente fortement le temps de capitalisation  $T_{Cap}$ , de 7 minutes à 20 minutes en moyenne. Cette activité est cependant à prendre en compte car elle est obligatoire à la fin du processus de prédimensionnement pour passer les revues de conception (CDR, PDR, etc...). Elle constitue également le principal moyen de capitalisation des connaissances et données des activités de prédimensionnement qui ont été réalisées. Intégrer cette étape augmente également légèrement le temps de recherche manuel  $T_{Rech\_manuelle}$ , car il faut rechercher beaucoup d’informations lors de la rédaction des livrables pour synthétiser toutes les données des activités réalisées. À l’exception de ces deux durées, les autres paramètres sont considérés constants entre les deux cas de figure. Sur cette base, les ROI sont calculés pour différents nombres de recherches  $n$  et sont rassemblés dans le tableau 4.21.

TABLE 4.21 – Calcul du ROI en fonction du nombre de recherches d’informations et en considérant ou non l’étape de rédaction des livrables

Nombre de recherches $n$	ROI (hors livrables)	ROI (avec livrables)
100	0.38	0.37
250	0.70	0.65
500	0.98	0.88
1000	1.21	1.06
1500	1.32	1.14
2000	1.38	1.19

D’après les résultats du tableau 4.21, mettre en place un système de capitalisation et de gestion des connaissances est bénéfique au-delà de 500 à 1000 recherches d’informations. Ce seuil est celui à partir

### 4.3. MISE EN ŒUVRE SUR LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION

---

duquel l'indicateur dépasse 1 respectivement pour le processus sans et avec la prise en compte de la rédaction des livrables. Le seuil de 1000 recherches est difficile à convertir en nombre d'activités ou de projets. Le temps total de recherche est de 2748 minutes (hors livrables) et de 2985 minutes (avec livrables) d'après les données des tableaux 4.13 et 4.14. Si un temps moyen de recherche unitaire de 5 minutes est considéré, alors cela représente entre 550 et 600 itérations par processus de prédimensionnement. D'après cette hypothèse, cela signifie qu'entre un et trois processus de prédimensionnement sont à réaliser pour que le système dépasse son seuil de rentabilité, d'après l'indicateur et en fonction de la variabilité de chaque paramètre. Les incertitudes ne sont pas prises en compte pour estimer le ROI pour se concentrer uniquement sur des données moyennes. Les paramètres vont également évoluer à travers plusieurs projets car plus le système est utilisé et plus les chances de trouver les informations dans la BDC augmentent.

L'intérêt de l'indicateur de ROI de la capitalisation des connaissances a été démontré sur le cas d'un processus de prédimensionnement, dont certaines données sont issues du prédimensionnement de lignes et d'arbres de transmission. Il a permis d'estimer l'intérêt et la rentabilité que peut apporter l'intégration d'un système de capitalisation des connaissances dans les processus métier à long terme, en particulier en prenant en considération le temps nécessaire au développement de cet outil. Il est également intéressant de mettre en relation ces données de ROI avec les gains d'efficacités apportés par le système KBE associé, démontrés dans les précédentes sous-sections, ainsi que le taux de capitalisation largement amélioré sur l'ensemble des activités de conception.

#### 4.3.6 Conclusion sur le système de mesure de la performance

Le système de mesure présenté au chapitre 3 couvre trois éléments autour du PDP, présentés sur la figure 1.2 : les activités métier, les outils métier et le processus de capitalisation. La performance de ces trois objets a été évaluée de façon indépendante, et nous allons maintenant réaliser l'analyse de l'ensemble des conclusions tirées avec ces KPI.

En ce qui concerne la performance des activités et du processus métier, des gains de performance importants ont été mesurés sur les deux activités métier dont les outils métier KBE ont été implémentés. Ces gains ont été mesurés à travers l'évaluation de la variation d'efficacité, KPI formulé dans notre proposition, avec en moyenne 169 % et 294 % de gain par l'utilisation des nouveaux outils dans le cas de la modélisation. Ces gains sont toutefois à relativiser au regard d'une incertitude élevée qui implique que ces gains seront parfois nuls ou négatifs, et parfois beaucoup plus importants. Les gains de deux cycles de prédimensionnement sont du même ordre de grandeur que les gains d'efficacité mesurés pour la première activité de modélisation du processus. En revanche, l'estimation des gains lors du passage à l'échelle pour un processus de prédimensionnement complet s'est révélée être trop sensible aux valeurs extrêmes considérées pour les temps de recherche d'informations, de réalisation et de capitalisation. Ainsi, des variations de performance allant de -32 % à 32 % ont été observées avec des incertitudes associées de plusieurs ordres de grandeurs supérieures pour le processus *to-be* qui suppose une augmentation du nombre d'activités. Le gain de performance final estimé est donc de 0.2 % ( $\pm 110$  %), soit aucune différence en moyenne. Le gain moyen est estimé entre 2 % et 45 % pour un processus *to-be* à nombre d'activités constant, avec un gain final pour le processus de 23 % ( $\pm 108$  %).

### 4.3. MISE EN ŒUVRE SUR LES ACTIVITÉS DE CONCEPTION

---

Dans le premier cas, réaliser plus d'activités pour mieux explorer l'espace des solutions conduirait à une performance moyenne nulle sans et avec l'utilisation de systèmes KBE, ce qui conduirait à annuler les bénéfices gagnés par l'utilisation des systèmes KBE. Cependant, pour le deuxième cas, il y aurait un gain de performance moyen d'une vingtaine de pour cent si le nombre d'activités reste constant, et donc cela validerait les apports de performance apportés par l'utilisation de systèmes KBE. Ces conclusions restent à confirmer dans des études complémentaires en raison des valeurs élevées des écarts-types associés aux valeurs moyennes, qui font que la performance peut augmenter ou diminuer en fonction des PDP étudiés.

Puis, concernant la performance des outils métier, les ROI des deux outils développés ont été calculés ainsi que leur complexité d'intégration dans le processus métier. Ces deux KPI, le premier issu de la littérature [22] et le deuxième proposé dans le système de mesure, aident à définir la pertinence du choix d'un outil dans le PDP. Les deux outils implémentés dans le logiciel KANO offrent un bénéfice aux alentours de la centaine d'utilisations, tout en n'étant que légèrement plus complexes à intégrer au processus, en passant d'une complexité faible à modérée.

Et, enfin, la mesure de la performance du processus de capitalisation a été réalisée avec deux KPI, proposés au chapitre 3 : le taux de capitalisation et le ROI de la capitalisation. L'évaluation du premier sur la base des expérimentations des concepteurs a mis en lumière le faible taux de capitalisation du processus métier *as-is*. Les points « qui ? », « quand ? », « comment ? », « où ? » et « pourquoi ? » en particulier sont peu relevés dans les activités courantes, mais une nette amélioration est observée dès lors que des livrables sont rédigés. L'utilisation d'un outil KBE, donc couplé à un processus de capitalisation, aide à capturer la majorité de ces informations contextuelles dans les BDC, ce qui fait augmenter les taux de capitalisation de l'ensemble des activités, à l'exception de la rédaction des livrables pour laquelle les outils KBE n'apportent pas de bénéfices. En ce qui concerne la quantification du ROI, nous avons estimé qu'il faut approximativement entre 500 et 1000 recherches d'informations pour amortir le coût de développement du système de capitalisation. La conversion de cet encadrement en un nombre de projets n'est pas évidente car dépendant du temps moyen de recherche d'une information et du nombre moyen de recherches durant chaque projet. En fonction de la variation de ces deux paramètres, cela pourrait correspondre à un nombre entre un et trois projets de prédimensionnement pour amortir le coût de développement, ce qui semble compétitif. Cette première estimation reste cependant large et pourra être affinée lors de futures études.

Finalement, au moyen d'un logiciel KBE développé pour les besoins de l'industriel Nexteam Group, le système de mesure proposé au chapitre 3 a été mis en œuvre sur des activités de conception industrielle. Cela a permis d'une part d'appliquer des solutions KBE à des problèmes industriels, ce qui était peu réalisé dans la littérature scientifique, ainsi que d'évaluer la performance associée à l'utilisation de ces outils. Il en ressort que les deux outils développés pour répondre aux activités de prédimensionnement apportent des gains de performance importants (mesurés par le gain d'efficacité), tout en offrant une meilleure capacité de capitalisation. Ils ne sont également que légèrement plus complexes à déployer dans le processus, sans que ça ne représente un frein pour l'industriel, et offrent un potentiel de ROI après une centaine d'utilisations, ce qui est admissible à l'échelle des projets industriels.

## 4.4 Conclusion de l'application

La figure 1.2, introduite au début du manuscrit, posait la question de savoir quel était l'impact du choix des outils métier et du processus de capitalisation sur la performance du PDP. Pour cela, le premier prérequis était de pouvoir quantifier cette performance, puis d'identifier les liens entre les différents éléments qui constituent le PDP : les activités métier, le processus de capitalisation et les outils métier. Les liens entre ces composants sont représentés sur la figure 1.2, et ce dernier chapitre a mis en œuvre les indicateurs pour quantifier les impacts des choix dans ces trois composants sur la performance du PDP.

L'objectif d'évaluer la performance d'un PDP qui intègre des outils de capitalisation des connaissances a nécessité l'implémentation d'un logiciel KBE, intitulé KANO. Ce logiciel KBE intègre deux outils métier en lien avec les activités de développement de l'entreprise Nexteam Group. Le premier outil est utilisé pour prédimensionner les lignes de transmission en fréquence et le deuxième est utilisé pour prédimensionner des arbres de transmission composite en fonction du chargement de torsion. Les outils ont été implémentés avec succès et sont utilisés dans le cas des activités de l'industriel, ce qui répond à un besoin initial. De plus, il a été vu que ces outils apportent des gains de performance significatifs pour les activités de modélisation de lignes et d'arbres de transmission. Le logiciel intègre également un volet de capitalisation et de gestion des connaissances, utilisé en complément des outils métier développés. Les outils liés à la capitalisation ont également pour objectif d'améliorer la performance du PDP, ce qui est vérifié dans un second temps avec le système de mesure de la performance.

Une fois le logiciel développé et mis au point, nous avons défini le protocole expérimental pour réaliser la mesure de la performance. L'explicitation du protocole est nécessaire pour s'inscrire dans la démarche du DRM, dans laquelle la recherche se doit d'être reproductible et comparable. Ainsi, les détails sur les données à mesurer ou encore les spécifications d'un CdCF expérimental sont formalisés pour aider à structurer une base commune de recherche.

L'application du système de mesure de la performance constitue la finalité de ces travaux de thèse. Les indicateurs utilisés évaluent la performance du processus métier, la performance des outils métier ainsi que la performance du processus de capitalisation, soit les trois éléments présentés sur la figure 1.2. Le système de mesure couvre donc l'ensemble des composants du PDP dans lequel nous souhaitons évaluer la performance. Les données relevées ont permis de constituer les KPI pour évaluer la performance des trois composants du PDP, et leur analyse conforte le choix des activités métier retenues pour développer les outils métier du logiciel KBE. Ces derniers offrent de larges gains de performance, de plusieurs centaines de pour cent en moyenne à l'échelle des activités, tout en permettant une opportunité de bénéfices à long terme pour, à la fois le processus métier, et le processus de capitalisation des connaissances. La mesure de la performance d'un PDP représente également la levée d'un verrou technique avec une première mise en œuvre du calcul de l'efficacité sur un processus industriel.

Enfin, le MM de *benchmark* est mis à jour sur la figure 4.15. Les protocoles de mesure de chacun des trois composants du PDP sont ajoutés aux collections expérimentales, dans l'objectif de fournir les éléments nécessaires aux pairs pour vérifier et étayer ces travaux de recherche. Viennent ensuite les différentes mesures réalisées sur la base des collections expérimentales et des jeux de données, les

#### 4.4. CONCLUSION DE L'APPLICATION

activités de prédimensionnement dans notre cas. Les mesures concernent tout d'abord les données pour calculer les taux de capitalisation des processus *as-is* et *to-be* (intégrant les outils KBE). Puis les mesures sont concentrées sur les activités de conception et le processus de prédimensionnement pour calculer les KPI de gains d'efficacité. Viennent ensuite les mesures sur les outils métier, afin de calculer les ROI et les complexités d'intégration de chacun d'entre eux. Et enfin, les mesures des temps liés à la recherche des informations, afin de pouvoir construire l'indicateur de ROI de la capitalisation des connaissances. L'ensemble de ces mesures et indicateurs conduit à pouvoir quantifier la performance aux trois niveaux du PDP : la performance des activités métier, la performance du processus de capitalisation et enfin la performance des outils métier.

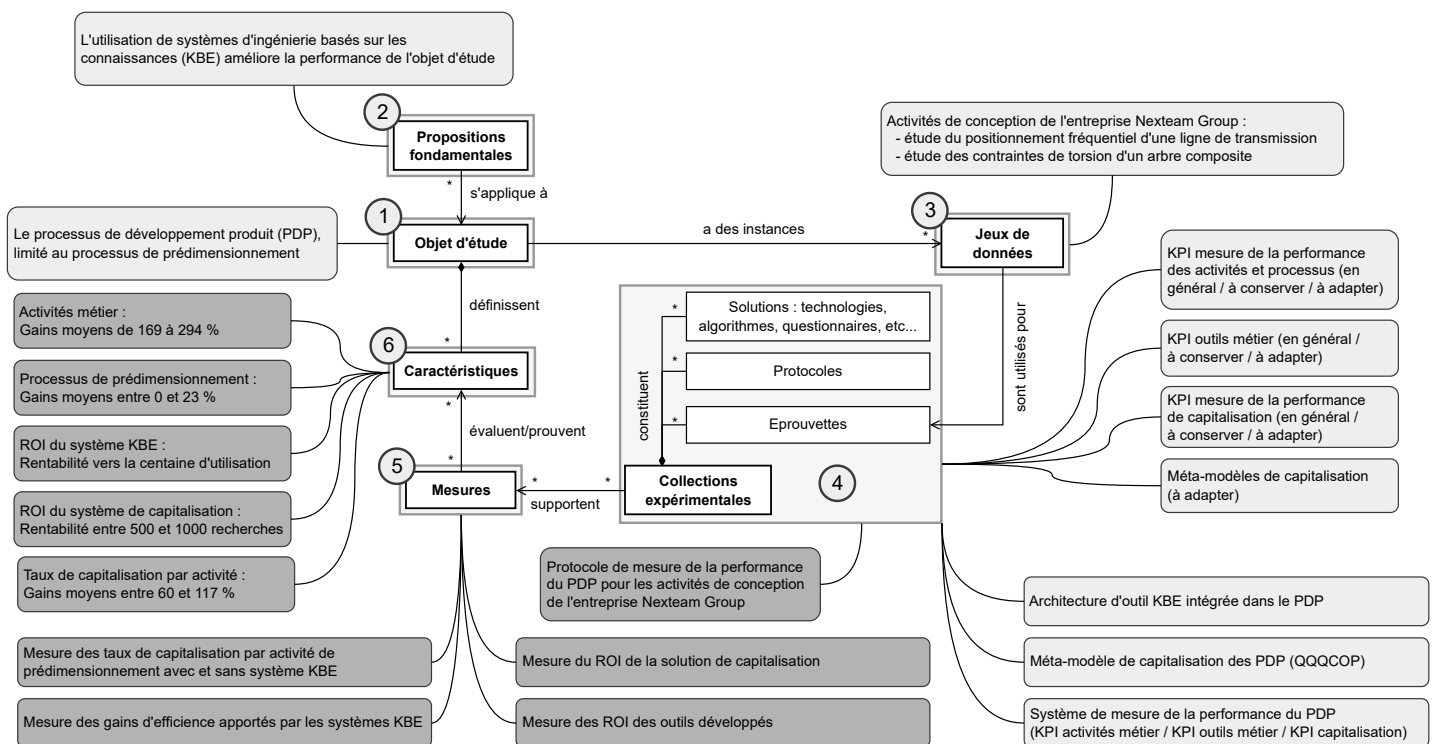


FIGURE 4.15 – Méta-modèle de benchmark à l'issue du chapitre 4

#### 4.4. CONCLUSION DE L'APPLICATION

---

# Conclusion

### Conclusion

Ces travaux de thèse s'intègrent dans un contexte industriel aéronautique, où les entreprises sont soumises à une concurrence de plus en plus accrue, avec des coûts et des délais de développement de produits qui se doivent d'être toujours plus réduits. Dans ce contexte, les industriels recherchent de nouveaux leviers de performance pour conserver ou accroître leur avantage concurrentiel. Plusieurs études font alors référence à la capitalisation des connaissances comme un potentiel levier de performance, au même titre que l'IA ou les jumeaux numériques. En effet, les industriels constatent qu'ils refont régulièrement les mêmes démarches, en suivant les mêmes méthodes et en utilisant les mêmes outils d'un projet à un autre, sans parvenir à automatiser les tâches chronophages et/ou avec peu de valeur ajoutée. La capitalisation des connaissances doit alors aider à réutiliser les moyens déjà déployés, lors des futurs projets, afin de réaliser plus rapidement ces tâches pour lesquelles les méthodes sont déjà formalisées. La problématique est donc de savoir quoi capitaliser, comment mettre en place le processus de capitalisation et enfin de déterminer s'il y aura des bénéfices à long terme. Si le bénéfice théorique apporté par la capitalisation des connaissances semble intéressant, il n'a pour l'heure pas été démontré ni quantifié à l'aide d'indicateurs de performance. La quantification des bénéfices apportés par de tels systèmes dans le temps passe par l'utilisation d'indicateurs de performance. Ces derniers, une fois identifiés, deviennent des vecteurs de la stratégie à déployer par un industriel sur les démarches de capitalisation et de réutilisation des connaissances par l'identification des leviers de performance (les paramètres influents). L'enjeu de cette thèse est alors d'apporter des outils de mesure pour quantifier la performance apportée par les outils de capitalisation, ce qui peut se formuler sous la forme de la question suivante : « quel est l'impact du choix des outils métier et des moyens de capitalisation sur les performances du processus de conception et du processus de capitalisation ».

Pour répondre à cette problématique, nous avons déployé la démarche suivante. L'analyse de l'état de l'art a d'abord été réalisée pour affiner le périmètre de l'étude, grâce à l'identification des éléments validés par la communauté scientifique et des verrous techniques qui restent à débloquent. Les conclusions de cette analyse ont aidé à constituer notre proposition scientifique, articulée autour de la définition d'un outil d'ingénierie basé sur les connaissances (KBE) et d'un système de mesure de la performance associé. Finalement, la dernière étape était celle de la validation de la proposition scientifique. Pour cela, le système KBE a été implémenté, et les différents indicateurs de performance du système de mesure proposé ont été évalués par les concepteurs de Nexteam Group à travers la réalisation de deux processus de prédimensionnement. Les expérimentations ont ainsi pu comparer les processus de conception sans et avec l'utilisation des systèmes KBE. Deux processus de prédimensionnement industriels ont servi à l'élaboration des spécifications du CdCF : le prédimensionnement en fréquences d'une ligne de transmission et le prédimensionnement en torsion d'un arbre de transmission composite. Les conclusions pour répondre à la problématique ont finalement été tirées des données obtenues par les expérimentations, avec des gains de performance importants, de plusieurs centaines de pour cent, obtenus à l'échelle des activités de prédimensionnement.

L'analyse de l'état de l'art a permis de mettre en évidence plusieurs verrous scientifiques qui ont orientés nos recherches. Tout d'abord, l'étude des processus de capitalisation des connaissances, ainsi que des ressources de capitalisation, au moyen de méta-modèles (MM) de capitalisation, a permis d'identifier une limite sur la richesse des cas d'usage capitalisables dans ces MM. Ce verrou a donc

## CONCLUSION

---

conduit à la proposition d'un MM, pour pallier ces manques, et capturer l'ensemble du spectre QQQ-COP qui caractérise le contexte de réalisation d'une activité ou d'un processus. Ensuite, nous avons examiné les principales méthodes KBE de la littérature, ainsi que les différents cas d'études qui les ont appliqués. Il a d'abord été souligné, dans plusieurs articles de *review*, que les approches KBE sont développées sur des cas d'études spécifiques, sans considérer l'extensibilité de l'approche ou des outils pour un plus large développement dans l'industrie. Une partie de notre proposition a alors été orientée vers le positionnement et la structuration des systèmes KBE dans le processus de développement de produits. De plus, l'analyse de la littérature a montré que la majorité des travaux qui avaient développé des systèmes KBE annonçaient des gains de coûts et de temps par leur utilisation, mais sans quantifier ces gains, et sans les mettre en perspective avec les coûts de développement de ces systèmes KBE, qui sont en général importants. Cette analyse a souligné l'absence de système de mesure de la performance adapté aux méthodes et outils KBE. La dernière partie de notre proposition s'articulait autour de la résolution de ce verrou scientifique, en proposant un système de mesure adapté à l'évaluation de la performance d'outils et méthodes KBE. Le système de mesure qui a été proposé est construit sur la base de divers indicateurs, dont certains sont issus de l'analyse de la littérature, pour quantifier la performance du PDP, du processus de capitalisation ainsi que des outils métier.

Les expérimentations réalisées par les concepteurs de l'entreprise Nexteam Group ont permis de valider les propositions apportées par ces travaux de thèse. L'impact du choix des outils métier, et des moyens de capitalisation, sur les performances du processus métier et du processus de capitalisation a pu être évalué avec le système de mesure proposé, répondant à notre problématique. En effet, les gains de performance des activités de conception, surtout pour les étapes de modélisation, ont été mesurés à plusieurs centaines de pour cent : entre 150 % et 300 % en moyenne pour respectivement la modélisation de lignes de transmission et la modélisation d'arbres composite. Ces gains ont cependant tendance à disparaître à l'échelle du processus, pour afficher une performance équivalente sans et avec système KBE. Cela s'est expliqué par l'hypothèse du nombre d'activités qui augmente avec l'utilisation d'outils automatisés, pour favoriser l'exploration de l'espace des solutions. À nombre d'activités similaires, les systèmes KBE apporteraient des gains moyens de 23 % à l'échelle d'un processus de prédimensionnement. Ensuite, en ce qui concerne le processus de capitalisation, l'utilisation du MM a aidé à capturer la majorité du contexte de réalisation des activités et processus. Cela a fait augmenter le taux de capitalisation des données à chaque étape du PDP, et donc la performance du processus de capitalisation. De plus, ce gain de performance a été obtenu pour une durée de capitalisation qui n'est pas invasive pour le concepteur, inférieure à la minute. La performance de la capitalisation a également été améliorée grâce à la facilitation des recherches d'informations dans la base de connaissance (BDC), jusqu'à dix fois plus rapides par rapport aux temps de recherche usuels. Nous avons calculé le ROI de la mise en place du système de capitalisation, avec un seuil de rentabilité atteint entre 500 et 1000 recherches d'informations. Ce nombre est à mettre en relation avec chaque environnement industriel et est difficile à observer sous une base commune. Dans notre contexte industriel, nous estimons qu'il est atteignable en un à trois projets en fonction des spécificités de chaque recherche. Finalement, les outils métier ont été étudiés à travers le prisme des indicateurs, notamment le ROI, qui affiche une rentabilité autour des 100 utilisations. De plus, la complexité d'intégration des outils KBE dans le processus métier a été calculée comme légèrement plus élevée que les outils usuels. L'ensemble des KPI du système de mesure ont permis de souligner que les outils apportent des bénéfices à court terme sur le processus métier et le processus de capitalisation, avec d'une part des gains de performance directement perceptibles (taux de capitalisation accrus, durée de modélisation réduite), ainsi que des

## CONCLUSION

---

bénéfices à long terme, avec des ROI qui atteignent leurs seuils de rentabilité dans des délais acceptables à l'échelle du processus industriel étudié.

Les contributions de cette thèse sont d'avoir proposé et validé une démarche d'évaluation de la performance du processus de développement de produits (PDP) en fonction de l'utilisation ou non d'outils et méthodes orientés sur la capitalisation des connaissances et l'automatisation de tâches répétitives. La démarche mise en œuvre a permis d'identifier certains résultats notables comme :

- Une structure de développement de système KBE générique, accompagnée d'un MM de capitalisation pour faire le lien entre une BDC et les outils métier de l'industriel.
- Un système de mesure de la performance à l'échelle des activités et des processus de conception. Ce système de mesure quantifie les performances du processus métier, du processus de capitalisation ainsi que des outils métier.
- Les outils d'ingénierie basés sur les connaissances, lorsqu'ils sont développés en considérant leur ROI et leur complexité d'intégration, apportent des bénéfices de performance à court et long terme sur à la fois le processus métier, le processus de capitalisation et le processus de recherche d'informations.

## Limites et perspectives

Bien que l'objectif de mesurer le gain de performance apporté par l'utilisation d'outils KBE sur le PDP ait été mené à bien, certaines hypothèses font apparaître des limites dans l'usage du système de mesure développé, et de nouvelles perspectives de recherches sont ouvertes.

### Limite liée à l'hypothèse de conservation de la connaissance

L'efficacité d'une activité s'exprime, pour rappel, comme la différence de connaissances, donc la différence des sorties par les entrées de l'activité, divisée par les ressources utilisées par l'activité. Or, la différence entre les sorties et les entrées n'est pas quantifiable sous une unité commune et compatible avec une unité assimilable à une ressource consommée. Le calcul du gain d'efficacité est alors conditionné par l'hypothèse de différences de connaissances constante entre deux activités. Cela permet de faire le rapport des efficacités de deux activités pour évaluer la variation de performance comme l'image de la variation des ressources consommées pour un résultat constant. Cette hypothèse empêche donc de comparer des activités différentes entre elles, puisque la différence entre les sorties et les entrées ne serait plus similaire. Le développement de nouveaux indicateurs de mesure de performance est donc une perspective pour augmenter les possibilités de comparaison des activités et donc des processus par extension.

### **Limite liée aux biais des mesures**

Réaliser des mesures uniquement avec des concepteurs d'un même BE induit l'apparition de différents biais. Le premier est qu'ils connaissent déjà une partie des outils utilisés, mais pas forcément les nouveaux du système KBE. Ce biais est corrigé en considérant une période de présentation et de prise en main du logiciel. Un autre biais apparaît lors des mesures, en comparant deux activités similaires avec des outils différents. Les concepteurs ont nécessairement obtenu des informations utiles à la deuxième itération lors de la première réalisation. Ce biais est plus difficile à empêcher, bien que cela ait été réalisé en adaptant les durées passées sur la deuxième itération en considérant le temps passé sur la première itération. Il est possible que d'autres biais aient altéré les résultats obtenus dans cette étude, sans que ça ne soit détecté, corrigé ou empêché. Le meilleur moyen de limiter l'impact de ces biais est de multiplier les résultats avec des reproductions de la démarche, mais avec des processus de conception, des outils métier et des concepteurs différents afin de consolider les résultats obtenus. La perspective principale est donc de réaliser d'autres démarches analogues dans des environnements industriels, de préférence de l'industrie aéronautique pour conserver un contexte d'étude similaire (durées de développement ou encore outils qui peuvent être similaires).

### **Changer la modélisation des résultats de distributions normales en distribution asymétrique sur intervalle semi-fini**

Les résultats des expérimentations ont été manipulés sous la forme d'une moyenne et d'un écart-type, dont l'objectif est d'estimer le potentiel de variation des valeurs autour de la moyenne. Or, plusieurs problèmes apparaissent avec cette approche qui repose sur une distribution normale des valeurs. Le premier point problématique est la possibilité d'avoir des valeurs négatives dès lors que la moyenne est inférieure à trois écarts-types : la distribution normale rassemble 99 % des valeurs entre la moyenne plus ou moins trois écarts-types. Dans notre cas d'étude, cela se traduit par des durées négatives, qui n'a plus de sens physique et fausse l'analyse. Une meilleure approche serait alors de considérer chaque couple « moyenne  $\pm$  écart-type », non plus comme une distribution normale, mais comme une distribution asymétrique et sur un intervalle semi-fini. Par exemple la loi Gamma, la loi du  $X^2$ , la loi de Weibull ou encore la loi de Lévy respectent ces deux critères pour représenter la distribution des durées mesurées. La définition de ces lois peut nécessiter plus de paramètres à définir, et plus de données de bases pour en définir la distribution réelle des mesures, ce qui rend leur définition plus difficile à implémenter. Les résultats seront en revanche plus précis pour estimer les variations autour de la moyenne, avec une sensibilité réduite aux valeurs extrêmes. Ce point est d'ailleurs le deuxième problème de l'utilisation de la loi normale. Dès lors que des valeurs très éloignées de la moyenne intègrent le jeu de données, la moyenne et l'écart-type subissent des variations importantes qui altèrent la représentation « normale » des données. Il est en théorie quasi-improbable d'obtenir une valeur excédant la moyenne plus ou moins cinq à six fois l'écart-type si une distribution est normale. Or, dans notre cas, une durée peut fréquemment dépasser les seuils identifiés en raison d'un problème de modélisation ou d'une recherche d'information qui s'éternise. Ce type de phénomène n'est pas assimilable à une distribution normale des données. Cette approche a tout de même été favorisée par sa simplicité de mise en œuvre et pour l'identification de premières tendances basées sur les moyennes observées.

### **Explorer la performance d'autres modèles formels de connaissances**

Nos travaux ont favorisé le choix d'un MM pour la formalisation et la capitalisation des connaissances, mais d'autres modèles formels sont également envisageables. La première alternative est l'uti-

lisation d'ontologies, qui reste une approche très utilisée dans la littérature scientifique, mais d'autres pistes plus innovantes sont possibles à explorer. Par exemple, l'utilisation d'IA ou de jumeaux numériques sont des technologies envisageables pour le processus de capitalisation et pour répondre à un cas d'usage. Ces solutions s'intégreraient en tant que ressources des activités de capitalisation, en complément ou à la place des MM de capitalisation utilisés dans ces travaux. Il s'agira de vérifier leur capacité à répondre aux objectifs de capitalisation et réutilisation des connaissances, mais également d'évaluer le gain de performance apporté par ces ressources. Ces solutions alternatives pourraient apporter des bénéfices dans cas spécifiques, par exemple pour assurer des meilleurs couplages et améliorer l'évaluation des incertitudes entre les modélisations de la physiques et le réel à travers les jumeaux numériques. L'IA serait plutôt utilisée pour améliorer la recherche d'informations dans les BDC, à travers l'utilisation d'agents conversationnels basés sur les grands modèles de langage (LLM pour *Large Language Model*) comme ChatGPT, Gemini, LLaMa, etc...

### **Développer l'outil KBE à plus large échelle dans un groupe industriel**

Enfin, la dernière perspective est de développer les approches d'ingénierie basées sur les connaissances dans d'autres branches industrielles et à un plus grand nombre d'activités. Ces travaux se sont limités à l'étude de deux activités de prédimensionnement, mais cela ne représente qu'une partie limitée du PDP complet. L'intégration d'activités variées, intégrant notamment la fabrication, l'approvisionnement matière ou encore les questions d'assemblage et de maintenance sont tout à fait envisageables au sein de logiciels KBE. De nouvelles études seront à mettre en place pour identifier quelles activités du PDP sont les plus pertinentes à intégrer à des systèmes KBE, afin de pouvoir améliorer l'ensemble de la performance du PDP.

# Bibliographie

- [1] L. Dray *et al.*, “Cost and emissions pathways towards net-zero climate impacts in aviation,” *Nature Climate Change*, vol. 12, n<sup>o</sup>. 10, p. 956–962, oct. 2022.
- [2] “Clean sky 2 cleared for take-off with €4.05b budget,” <https://sciencebusiness.net/news/76201/Clean-Sky-2-cleared-for-take-off-with-%E2%82%AC4.05B-budget>, accessed : 2022-09-30.
- [3] “Le conseil pour la recherche aéronautique civile,” <https://aerorechercheorac.com/>, accessed : 2023-05-22.
- [4] D. Zouaoua-Ragab, “Lois d’évolution de triz pour la conception des futures générations des produits : proposition d’un modèle,” Thèse de doctorat, 2012, thèse de doctorat dirigée par Richir, Simon et Crubleau, Pascal Génie industriel Paris, ENSAM 2012. [En ligne]. Disponible : <http://www.theses.fr/2012ENAM0007>
- [5] J. Terninko, A. Zusman et B. Zlotin, *Systematic Innovation : An Introduction to TRIZ (Theory of Inventive Problem Solving)*, ser. APICS Series on Resource Management. Taylor & Francis, 1998. [En ligne]. Disponible : <https://books.google.fr/books?id=QqPCvdo23dgC>
- [6] L. T. Blessing et A. Chakrabarti, *DRM, a Design Research Methodology*. London : Springer London, 2009. [En ligne]. Disponible : <http://link.springer.com/10.1007/978-1-84882-587-1>
- [7] R. Pinquie *et al.*, “An open science platform for benchmarking engineering design researches,” *Procedia CIRP*, vol. 109, p. 472–477, 2022.
- [8] A. F. de Mécanique, *Livre Blanc de la Recherche en Mécanique. Enjeux industriels et sociétaux. Recherche, innovation, formation*. EDP Sciences, févr. 2015. [En ligne]. Disponible : <https://www.edp-open.org/books/edp-open-books/293-livre-blanc-de-la-recherche-en-mecanique>
- [9] *Vision 2050*, févr. 2011. [En ligne]. Disponible : <https://www.iata.org/contentassets/bccae1c5a24e43759607a5fd8f44770b/vision-2050.pdf>
- [10] *Destination 2050 - A Route To Net Zero European Aviation*, févr. 2021. [En ligne]. Disponible : [https://res.cloudinary.com/gifas/image/upload/v1613030136/doc-actu/Destination2050\\_Full\\_Report\\_20210205\\_ohkpw5.pdf](https://res.cloudinary.com/gifas/image/upload/v1613030136/doc-actu/Destination2050_Full_Report_20210205_ohkpw5.pdf)
- [11] C. Berliner et J. Brimson, *Cost Management for Today’s Advanced Manufacturing : The CAM-I Conceptual Design*. Harvard Business School Press, 1988. [En ligne]. Disponible : <https://books.google.fr/books?id=QfZTAAAAMAAJ>
- [12] J. J. Y. Tan, K. N. Otto et K. L. Wood, “Relative impact of early versus late design decisions in systems development,” *Design Science*, p. 27, Jun 2017.
- [13] D. G. Ullman, *The mechanical design process : product discovery, project planning, product definition, conceptual design, product development, product support*, 4<sup>e</sup> éd., ser. McGraw-Hill series in mechanical engineering. Boston : McGraw-Hill, 2010.

- [14] R. Chermaneau, L. Guillaumat et F. Dau, “Transport de la variabilité dans les matériaux composites = incertainties propagation in composite materials,” 06 2009.
- [15] W. Es Soufi, “Modélisation et fouille des processus en vue d’assister la prise de décisions dans le contexte de la conception et la supervision des systèmes,” Theses, Ecole nationale supérieure d’arts et métiers - ENSAM, déc. 2018. [En ligne]. Disponible : <https://pastel.hal.science/tel-02180539>
- [16] F. O’Donnell et A. Duffy, “Modelling design development performance,” *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 22, n<sup>o</sup>. 11, p. 1198–1221, nov. 2002.
- [17] S. Cedergren, A. Wall et C. Norström, “Evaluation of performance in a product development context,” *Business Horizons*, vol. 53, n<sup>o</sup>. 4, p. 359–369, juill. 2010.
- [18] S. Cedergren, “Performance in product development - the case of complex products,” Thèse de doctorat, Mälardalen University, avr. 2011, iSSN 1404-3041 ISRN MDH-MRTC-243/2010-1-SE. [En ligne]. Disponible : <http://www.es.mdu.se/publications/1794->
- [19] R. O. Shannak, “Measuring knowledge management performance,” *European Journal of Scientific Research*, vol. 35, p. 242–253, janv. 2009.
- [20] B. Gries et J. Restrepo, “Kpi measurement in engineering design - a case study,” dans *DS 68-1 : Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11)*, vol. 1, Lyngby/Copenhagen, Denmark, août 2011, p. 531–537.
- [21] R. Arora, “Implementing km – a balanced score card approach,” *Journal of Knowledge Management*, vol. 6, n<sup>o</sup>. 3, p. 240–249, août 2002.
- [22] C. van der Velden, C. Bil et X. Xu, “Adaptable methodology for automation application development,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 26, n<sup>o</sup>. 2, p. 231–250, avr. 2012.
- [23] R. Kchirid, Aminaand Temnati, *Chapitre 6. Fonctions de l’entreprise*, ser. Hors collection. Paris : Ellipses, 2021, p. 103–130. [En ligne]. Disponible : [https://www.cairn.info/load\\_pdf.php?ID\\_ARTICLE=ELLLKCHIR\\_2021\\_01\\_0103](https://www.cairn.info/load_pdf.php?ID_ARTICLE=ELLLKCHIR_2021_01_0103)
- [24] A. Neely, M. Gregory et K. Platts, “Performance measurement system design : A literature review and research agenda,” *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 25, n<sup>o</sup>. 12, p. 1228–1263, 2005.
- [25] M. W. Meyer et V. Gupta, “The performance paradox,” *Research in organizational behavior*, vol. 16, p. 309–309, 1994.
- [26] R. Dwight, “Searching for real maintenance performance measures,” *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 5, p. 258–275, 09 1999.
- [27] A. Rolstadas, “Enterprise performance measurement,” *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 18, p. 989–999, 11 1998.
- [28] K. Clark et T. Fujimoto, *Product Development Performance : Strategy, Organization, and Management in the World Auto Industry*. Harvard Business School Press, 1991. [En ligne]. Disponible : <https://books.google.fr/books?id=7cCAASTW6IQC>
- [29] P. A. Emmanuelides, “Towards an integrative framework of performance in product development projects,” *Journal of Engineering and Technology Management*, vol. 10, n<sup>o</sup>. 4, p. 363–392, 1993. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/092347489390029I>
- [30] I. Drongelen et A. Cooke, “Design principles for the development of measurement systems for research and development processes,” *R&D Management*, vol. 27, p. 345 – 357, 10 1997.

- [31] D. Sinclair et M. Zairi, "Effective process management through performance measurement : Part iii-an integrated model of total quality-based performance measurement," *Business Process Management Journal*, vol. 1, n<sup>o</sup>. 3, p. 50–65, 1995.
- [32] K. Säfsten *et al.*, *Effektiv produktframtagning : analys och hantering av osäkerhet, komplexitet och spridning*, 01 2010.
- [33] V. Ermolayev et W.-E. Matzke, "Performance in industrial holonic systems," 01 2007, p. 383–386.
- [34] J. Harbour, *The Basics of Performance Measurement*. Taylor & Francis, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://books.google.fr/books?id=ZWn0wQS1veUC>
- [35] G. J. Colquhoun, R. W. Baines et R. Crossley, "A state of the art review of ideo," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 6, n<sup>o</sup>. 4, p. 252–264, juill. 1993.
- [36] P. R. N. Childs, *Mechanical design engineering handbook*, second edition éd. Oxford ; Cambridge, MA : Butterworth-Heinemann, 2019.
- [37] V. Krishnan et K. Ulrich, "Product development decisions : A review of the literature," *Management Science*, vol. 47, p. 1–21, 01 2001.
- [38] C. Loch et S. Kavadias, *Handbook of new product development management*. Amsterdam New York : Butterworth-Heinemann, 2008.
- [39] S. C. Wheelwright et K. B. Clark, "Revolutionizing new product development : Quantum leaps in speed, efficiency, and quality." Maxwell-Macmillan, 1992.
- [40] L. Fu, P. Jiang et W. Cao, "Modeling and performance analysis of product development process network," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 36, n<sup>o</sup>. 6, p. 1489–1502, 2013. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804513000441>
- [41] H. Rozenfeld *et al.*, *Gestão de desenvolvimento de produtos : uma referência para a melhoria do processo*. Saraiva, 2006.
- [42] D. Clausing, *Total Quality Development : A Step by Step Guide to World Class Concurrent Engineering*. ASME Press, 01 1998. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1115/1.800695>
- [43] K. Otto et K. Wood, *Product Design : Techniques in Reverse Engineering and New Product Development : Techniques in Reverse Engineering and New Product Development*. United States : Prentice Hall, 2001.
- [44] K. Ulrich et S. Eppinger, *Product Design and Development*, ser. Irwin series in marketing. McGraw-Hill/Irwin, 2004. [En ligne]. Disponible : <https://books.google.fr/books?id=Qju5AAAAIAAJ>
- [45] C. McMahon, B. Ion et P. Hamilton, "Sharing experience in engineering design education : historical background and future plans," Stockholm, août 2003. [En ligne]. Disponible : [https://www.designsociety.org/download-publication/23987/sharing\\_experience\\_in\\_engineering\\_design\\_education\\_historical\\_background\\_and\\_future\\_plans](https://www.designsociety.org/download-publication/23987/sharing_experience_in_engineering_design_education_historical_background_and_future_plans)
- [46] S. Pugh, "Total design : Integrated methods for successful product engineering," 01 1991.
- [47] G. Boothroyd, "Product design for manufacture and assembly," *Computer-Aided Design*, vol. 26, p. 505–520, 07 1994.
- [48] M. Baxter, *Product Design : A Practical Guide to Systematic Methods of New Product Development*. London : CRC Press, 1995. [En ligne]. Disponible : <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315275246/product-design-mike-baxter>
- [49] G. Pahl et W. Beitz, "Engineering design : A systematic approach," 1984.
- [50] G. Pahl, K. Wallace et L. Blessing, *Engineering design : a systematic approach*, 3<sup>e</sup> éd. London : Springer, 2007.

- [51] N. P. Suh, A. C. Bell et D. C. Gossard, "On an axiomatic approach to manufacturing and manufacturing systems," *Journal of Engineering for Industry*, vol. 100, p. 127–130, 1978.
- [52] L. Fan *et al.*, "Axiomatic design theory : further notes and its guideline to applications," *International Journal of Materials and Product Technology*, vol. 51, n<sup>o</sup>. 4, p. 359, 2015.
- [53] C. A. Brown, "Teaching axiomatic design to engineers—theory, applications, and software," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 24, p. 186–195, 2005.
- [54] D. Frey, E. Jahangir et F. Engelhardt, "Computing the information content of decoupled design," *Research in Engineering Design*, vol. 12, p. 90–102, 10 2000.
- [55] D. Tate, "Axiomatic design : Review, impact, and future direction," 09 2016. [En ligne]. Disponible : [https://doi.org/10.1115/1.861080\\_ch29](https://doi.org/10.1115/1.861080_ch29)
- [56] Y. Jin *et al.*, "Axiomatic design method for supercritical rotor dynamics integrating nonlinear deep knowledge," *Procedia CIRP*, vol. 53, p. 237–246, 2016.
- [57] R. G. Cooper, "Stage-gate systems : A new tool for managing new products," *Business Horizons*, vol. 33, n<sup>o</sup>. 3, p. 44–54, May 1990.
- [58] Department of Defense - System Management College, *Systems Engineering Fundamentals*, Virginia, Jan 2001. [En ligne]. Disponible : <https://acqnotes.com/wp-content/uploads/2017/07/DAU-Systems-Engineering-Fundamentals.pdf>
- [59] VDI Society for Product Development, Design and Marketing (Committee for Systematic Design), *VDI 2221 : Systematic Approach to the Design of Technical Systems and Products*, ser. VDI guidelines. The Association of German Engineers, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/vdi-2221-f1/eu161184/259405>
- [60] *Panne de boîte de transmission principale et collision avec un plan d'eau du Sikorsky S92-A C-GZCH exploité par Cougar Helicopters Incorporated à 35 milles marins à l'est de St. John's (Terre-Neuve-et-Labrador) le 12 mars 2009*. Gatineau, Québec : Bureau de la sécurité des transports du Canada, 2010.
- [61] A. Geromin, "Synthèse des connaissances métiers pour l'émergence des modèles géométriques, application aux arbres de transmission de puissance mécanique," Thèse de doctorat, 2019.
- [62] A. Geromin *et al.*, "Cad modelling based on knowledge synthesis for design rational," *Procedia CIRP*, vol. 70, p. 156–161, 2018.
- [63] P. Robinson, E. Greenhalgh et S. Pinho, *Failure Mechanisms in Polymer Matrix Composites : Criteria, Testing and Industrial Applications*, 01 2012.
- [64] F. Malburet et T. Krysinski, *Origine et contrôle des vibrations mécaniques : Méthodes passives et actives*. Marseille, France : Hermes Science Publications, 01 2003.
- [65] T. Krysinski et F. Malburet, *Instabilité mécanique - Contrôles actifs et passifs*. Marseille, France : Hermes - Lavoisier, 09 2009.
- [66] A. Moosfeld, *MSC Nastran 2013.1 - Dynamic Analysis User's Guide*, Dec 2013.
- [67] *MSC Nastran 2016 - Rotordynamics User's Guide*, Apr 2016.
- [68] K. Tahera *et al.*, "Testing in the incremental design and development of complex products," *Research in Engineering Design*, vol. 30, n<sup>o</sup>. 2, p. 291–316, avr. 2019.
- [69] M. Heymann, *"Kunst" und Wissenschaft in der Technik des 20. Jahrhunderts : zur Geschichte der Konstruktionswissenschaft*. Chronos, 2005. [En ligne]. Disponible : <https://books.google.fr/books?id=T38hAQAIAAJ>
- [70] L. Blessing, A. Chakrabarti et K. Wallace, "Some issues in engineering design research," dans *OU/SERC Design Methods Workshop, The Open University, Milton Keynes*, 1992.

- [71] ———, “A design research methodology,” H. V, édit. Prague : International Conference on Engineering Design (ICED), Aug 1995, p. 7.
- [72] C. McMahon, *The Future of Design Research : Consolidation, Collaboration and Inter-Disciplinary Learning ?*, 04 2011, p. 275–284.
- [73] P. Badke-Schaub, J. Daalhuizen et N. Roozenburg, *The Future of Design Methodology*. London : Springer London, 2011. [En ligne]. Disponible : <http://link.springer.com/10.1007/978-0-85729-615-3>
- [74] L. T. M. Blessing, A. Chakrabarti et K. M. Wallace, “An overview of descriptive studies in relation to a general design research methodology,” dans *Designers*, E. Frankenberger, H. Birkhofer et P. Badke-Schaub, édit. London : Springer London, 1998, p. 42–56.
- [75] A. Chakrabarti, *Towards a Taxonomy of Design Research Areas*, 04 2011, p. 249–259.
- [76] L. Becerril, M. Guertler et E. Longa, “Developing design methods - a conceptual requirement framework,” vol. 1, n<sup>o</sup>. 1, Jul 2019, p. 1463–1472.
- [77] A. Chakrabarti et L. Blessing, “A review of theories and models of design,” vol. 95, 2015, p. 16.
- [78] P. J. Cash, “Developing theory-driven design research,” *Design Studies*, vol. 56, p. 84–119, May 2018.
- [79] A. Barth, E. Caillaud et B. Rose, “How to validate research in engineering design ?” vol. 2, août 2011, p. 11.
- [80] U. Schultze et R. Boland, “Knowledge management technology and the reproduction of knowledge work practices,” *The Journal of Strategic Information Systems*, vol. 9, n<sup>o</sup>. 2–3, p. 193–212, sept. 2000.
- [81] J. Dekhtiar *et al.*, “Deep learning for big data applications in cad and plm - research review, opportunities and case study,” *Computers in Industry*, vol. 100, p. 227–243, sept. 2018.
- [82] E. Lutters *et al.*, “Tools and techniques for product design,” *CIRP Annals*, vol. 63, n<sup>o</sup>. 2, p. 607–630, 2014.
- [83] R. Brandao et M. Wynn, “Improving the new product development process through ict systems in the aerospace industry - a report on case study research,” dans *2009 International Conference on Information, Process, and Knowledge Management*. Cancun, Mexico : IEEE, févr. 2009, p. 147–152. [En ligne]. Disponible : <http://ieeexplore.ieee.org/document/4782580/>
- [84] W. J. Verhagen *et al.*, “A method for identification of automation potential through modeling of engineering processes and quantification of information waste,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 29, n<sup>o</sup>. 3, p. 307–321, août 2015.
- [85] F. Ameri et D. Dutta, “Product lifecycle management : Closing the knowledge loops,” *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 2, n<sup>o</sup>. 5, p. 577–590, janv. 2005.
- [86] B. D. Klein, D. L. Goodhue et G. B. Davis, “Can humans detect errors in data ? impact of base rates, incentives, and goals,” *MIS Quarterly*, vol. 21, n<sup>o</sup>. 2, p. 169, juin 1997.
- [87] B. Hicks, “Lean information management : Understanding and eliminating waste,” *International Journal of Information Management*, vol. 27, n<sup>o</sup>. 4, p. 233–249, août 2007.
- [88] B. Hicks, S. Culley et C. McMahon, “A study of issues relating to information management across engineering smes,” *International Journal of Information Management*, vol. 26, n<sup>o</sup>. 4, p. 267–289, août 2006.
- [89] P. Kügler *et al.*, “The evolution of knowledge-based engineering from a design research perspective : Literature review 2012–2021,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 55, p. 101892, janv. 2023.

- [90] W. J. Verhagen *et al.*, “A critical review of knowledge-based engineering : An identification of research challenges,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 26, n<sup>o</sup>. 1, p. 5–15, janv. 2012.
- [91] P. Sainter, K. Oldham et A. Larkin, “Achieving benefits from knowledge-based engineering systems in the longer-term as well as in the short term,” janv. 2000.
- [92] K. Dalkir, *Knowledge Management in Theory and Practice*, 0<sup>e</sup> éd. Routledge, 2005. [En ligne]. Disponible : <https://www.taylorfrancis.com/books/9781136389757>
- [93] G. Kebede, “Knowledge management : An information science perspective,” *International Journal of Information Management*, vol. 30, n<sup>o</sup>. 5, p. 416–424, 2010. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268401210000290>
- [94] M. Sarrafzadeh, B. Martin et A. Hazeri, “Lis professionals and knowledge management : Some recent perspectives,” *Library Management*, vol. 27, p. 621–635, 12 2006.
- [95] Y.-L. Cheung *et al.*, “Corporate governance in china : A step forward,” *European Financial Management*, vol. 16, p. 94 – 123, 01 2010.
- [96] H. J. Van Meter, “Revising the dikw pyramid and the real relationship between data, information, knowledge and wisdom,” *Law, Technology and Humans*, vol. 2, n<sup>o</sup>. 2, p. 69–80, Nov 2020.
- [97] S. Z. Elgin, “Merely partial definition and the analysis of knowledge,” *Synthese*, vol. 198, n<sup>o</sup>. S7, p. 1481–1505, Apr 2021.
- [98] C. Zins, “Conceptual approaches for defining data, information, and knowledge,” *JASIST*, vol. 58, p. 479–493, 02 2007.
- [99] N. Sharma, “The origin of data information knowledge wisdom (dikw) hierarchy,” p. 5, Apr 2008.
- [100] T. Aven, “A conceptual framework for linking risk and the elements of the data–information–knowledge–wisdom (dikw) hierarchy,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 111, p. 30–36, Mar 2013.
- [101] S. Baskarada et A. Koronios, “Data, information, knowledge, wisdom (dikw) : A semiotic theoretical and empirical exploration of the hierarchy and its quality dimension,” *Australasian Journal of Information Systems*, vol. 18, n<sup>o</sup>. 1, Nov 2013. [En ligne]. Disponible : <http://journal.acs.org.au/index.php/ajis/article/view/748>
- [102] S. Osadchy *et al.*, “Research of dikw and 5c architectural models for creation of cyber-physical production systems within the concept of industry 4.0,” *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, vol. 1, n<sup>o</sup>. 1 (15), p. 132–140, Mar 2021.
- [103] G. Simoni, “Comment capitaliser les connaissances générées par les projets de r&d?” *Annales des Mines - Gérer et comprendre*, vol. N<sup>o</sup> 91, n<sup>o</sup>. 1, p. 67–78, mars 2008.
- [104] T. Davenport, D. Long et M. Beers, “Successful knowledge management projects,” *Sloan Management Review*, vol. 40, p. 43–57, 12 1998.
- [105] R. L. Ackoff, “From data to wisdom,” *Journal of Applied Systems Analysis*, vol. 16, p. 3–9, 1989.
- [106] I. Nonaka et T. Irotaka, *The knowledge-creating company : How Japanese companies create the dynamics of innovation*, oup usa éd., 1995, vol. 105.
- [107] I. Nonaka, K. Umemoto et D. Senoo, “From information processing to knowledge creation : a paradigm shift in business management,” p. 16, 1996.
- [108] M. Polanyi et A. Sen, *The Tacit Dimension*. University of Chicago Press, 2009. [En ligne]. Disponible : <https://books.google.fr/books?id=zfsb-eZHPy0C>
- [109] P. Adler, “The dynamic relationship between tacit and codified knowledge : Comments on ikujiro nonaka’s, ”managing innovation as an organizational knowledge creation process,” 01 1996.

- [110] R. McAdam et S. McCreedy, “A critical review of knowledge management models,” *The Learning Organization*, vol. 6, p. 0–0, 1999.
- [111] S. Gourlay, “The seci model of knowledge creation : Some empirical shortcomings,” *4th European Conference on Knowledge Management*, 01 2003.
- [112] M. Alavi et D. E. Leidner, “Review : Knowledge management and knowledge management systems : Conceptual foundations and research issues,” *MIS Quarterly*, vol. 25, n<sup>o</sup>. 1, p. 107, Mar 2001.
- [113] B. Eynard, “Gestion du cycle de vie des produits et dynamique des connaissances industrielles en conception intégrée,” Habilitation à diriger des recherches, Université de Technologie de Compiègne, nov. 2005. [En ligne]. Disponible : <https://theses.hal.science/tel-03128022>
- [114] F. Demoly, K.-Y. Kim et I. Horváth, “Ontological engineering for supporting semantic reasoning in design : deriving models based on ontologies for supporting engineering design,” *Journal of Engineering Design*, vol. 30, n<sup>o</sup>. 10–12, p. 405–416, déc. 2019.
- [115] R. Barbedienne *et al.*, “Modeling framework for a consistent integration of geometry knowledge during conceptual design,” *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 19, n<sup>o</sup>. 2, p. 021009, juin 2019.
- [116] X. Pan *et al.*, “Evolving to multi-modal knowledge graphs for engineering design : state-of-the-art and future challenges,” *Journal of Engineering Design*, p. 1–40, janv. 2024.
- [117] A. C. B. Garcia et H. C. Howard, “Acquiring design knowledge through design decision justification,” *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, vol. 6, n<sup>o</sup>. 1, p. 59–71, févr. 1992.
- [118] J. Zachman, “Zachman, j. : A framework for information systems architecture. ibm systems journal 26, 276-292,” *IBM Systems Journal*, vol. 38, p. 276 – 292, 02 1987.
- [119] “Omg unified modeling language (omg uml), superstructure, version 2.4.1,” Aug 2011. [En ligne]. Disponible : <https://www.omg.org/spec/UML/2.4.1/Superstructure/PDF>
- [120] F. Noël et L. Roucoules, “The ppo design model with respect to digital enterprise technologies among product life cycle,” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 21, n<sup>o</sup>. 2, p. 139–145, Mar 2008.
- [121] M. Z. Ouertani, “Depnet : une approche support au processus de gestion de conflits basée sur la gestion des dépendances de données de conception,” Sciences de l’ingénieur, Henri Poincaré, Nancy 1, 2007. [En ligne]. Disponible : <https://theses.hal.science/tel-01748149v2>
- [122] J. Zachman, “A framework for information systems architecture,” *IBM Systems Journal*, vol. 38, p. 454–470, 01 1999.
- [123] F. Daoudi et S. Nurcan, “A benchmarking framework for methods to design flexible business processes,” *Software Process : Improvement and Practice*, vol. 12, p. 51–63, 01 2007.
- [124] P. Couturier *et al.*, “Tracking the consequences of design decisions in mechatronic systems engineering,” *Mechatronics*, vol. 24, p. 107, 112, 113, 124, 244, 04 2014.
- [125] E. Moones, E. Yahia et R. Lionel, “Design process and trace modelling for design rationale capture,” 06 2015.
- [126] M. Labrousse et A. Bernard, *FBS-PPRE, an enterprise knowledge lifecycle model*. Springer, Berlin, Heidelberg, 01 2008, p. 285–305.
- [127] F. Heidari, P. Loucopoulos et Z. Kedad, “A quality-oriented business process meta-model,” dans *Enterprise and Organizational Modeling and Simulation*, vol. 88, 06 2011, p. 85–99.

- [128] L. Thom, C. Iochpe et B. Mitschang, “A transactional metamodel for business process modeling with support to business process patterns,” dans *CAiSE Short Paper Proceedings*, 01 2005, p. 64–91 501.
- [129] P. Martins et M. Zacarias, “Business process and practice alignment meta-model,” *Procedia Computer Science*, vol. 64, p. 314–323, 10 2015.
- [130] B.-E. Lee et S.-H. Suh, “An architecture for ubiquitous product life cycle support system and its extension to machine tools with product data model,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 42, p. 606–620, 05 2008.
- [131] S.-H. Suh *et al.*, “Ubidm : A new paradigm for product design and manufacturing via ubiquitous computing technology,” *Int. J. Computer Integrated Manufacturing*, vol. 21, p. 540–549, 07 2008.
- [132] V. Robin, B. Rose et P. Girard, “Modelling collaborative knowledge to support engineering design project manager,” *Computers in Industry*, vol. 58, n<sup>o</sup>. 2, p. 188–198, févr. 2007.
- [133] F. Demoly *et al.*, “Multiple viewpoint modelling framework enabling integrated product–process design,” *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 4, n<sup>o</sup>. 4, p. 269–280, nov. 2010.
- [134] ———, “Integrated product relationships management : a model to enable concurrent product design and assembly sequence planning,” *Journal of Engineering Design*, vol. 23, n<sup>o</sup>. 7, p. 544–561, juill. 2012.
- [135] R. Paige, J. Ostroff et P. Brooke, “Principles for modeling language design,” *Information and Software Technology*, vol. 42, n<sup>o</sup>. 10, p. 665–675, juill. 2000.
- [136] B. Meyer, *Object-oriented Software Construction*, ser. Prentice-Hall international series in computer science. Prentice-Hall, 1988. [En ligne]. Disponible : <https://books.google.fr/books?id=kn0xNyridvkC>
- [137] E. Moones, E. Yahia et L. Roucoules, “Design process and trace modelling for design rationale capture,” dans *Joint Conference on Mechanical, Design Engineering & Advanced Manufacturing*, Toulouse, France, juin 2015. [En ligne]. Disponible : <https://hal.science/hal-01143055>
- [138] G. L. Rocca, “Knowledge based engineering : Between ai and cad. review of a language based technology to support engineering design,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 26, n<sup>o</sup>. 2, p. 159–179, avr. 2012.
- [139] M. Azevedo, S. Tavares et A. L. Soares, *The Digital Twin as a Knowledge-Based Engineering Enabler for Product Development*, ser. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Cham : Springer International Publishing, 2020, vol. 598, p. 450–459. [En ligne]. Disponible : [http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-62412-5\\_37](http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-62412-5_37)
- [140] C. Renzi, A. Ceruti et F. Leali, “Integrated geometrical and dimensional tolerances stack-up analysis for the design of mechanical assemblies : an application on marine engineering,” *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 15, n<sup>o</sup>. 5, p. 631–642, sept. 2018.
- [141] M. Peroni *et al.*, *Design Archetype of Gears for Knowledge Based Engineering*, ser. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham : Springer International Publishing, 2017, p. 1131–1140. [En ligne]. Disponible : [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-45781-9\\_113](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-45781-9_113)
- [142] J. Schmidt *et al.*, “A framework for capturing and applying design knowledge in complex systems,” *Transdisciplinary Engineering : Crossing Boundaries*, oct. 2016.
- [143] O. Kuhn *et al.*, “Framework for the support of knowledge-based engineering template update,” *Computers in Industry*, vol. 63, n<sup>o</sup>. 5, p. 423–432, juin 2012.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [144] N. Milton, *Knowledge Technologies*, ser. CoRR. Giandomenico Sica, févr. 2008, vol. abs/0802.3789. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.48550/arXiv.0802.3789>
- [145] D. Baxter *et al.*, “An engineering design knowledge reuse methodology using process modelling,” *Research in Engineering Design*, vol. 18, n<sup>o</sup>. 1, p. 37–48, avr. 2007.
- [146] D. Cooper et G. LaRocca, “Knowledge-based techniques for developing engineering applications in the 21st century,” *7th AIAA ATIO Conference, 2nd CEIAT Int’l Conference on Innov and Integr in Aero Sciences, 17th LTA Systems Tech Conference; followed by 2nd TEOS Forum*, p. 23, sept. 2007.
- [147] P. Bermell-García et I.-S. Fan, “A kbe system for the design of wind tunnel models using reusable knowledge components,” dans *International Congress on Project Engineering*, Barcelona, 2002, p. 0594–0604. [En ligne]. Disponible : <https://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/81867?locale-attribute=en>
- [148] C. B. Chapman et M. Pinfold, “The application of a knowledge based engineering approach to the rapid design and analysis of an automotive structure,” *Advances in Engineering Software*, vol. 32, n<sup>o</sup>. 12, p. 903–912, déc. 2001.
- [149] M. Stokes, “Managing engineering knowledge : Moka methodology for knowledge based engineering applications,” Mar 2001. [En ligne]. Disponible : <https://www.wiley.com/enie/Managing+Engineering+Knowledge:+MOKA+Methodology+for+Knowledge+Based+Engineering+Applications-p-9781860582950>
- [150] S. Cooper, I.-S. Fan et G. Li, *Achieving Competitive Advantage through Knowledge-Based Engineering*. Dept. of Enterprise Integration, Cranfield University, 1999.
- [151] C. Beierle et G. Kern-Isberner, *Methoden wissensbasierter Systeme*, ser. Computational Intelligence. Springer Vieweg Wiesbaden, 01 2014.
- [152] G. Schreiber *et al.*, “Commonkads : a comprehensive methodology for kbs development,” *IEEE Expert*, vol. 9, n<sup>o</sup>. 6, p. 28–37, déc. 1994.
- [153] R. Studer, V. Benjamins et D. Fensel, “Knowledge engineering : Principles and methods,” *Data & Knowledge Engineering*, vol. 25, n<sup>o</sup>. 1–2, p. 161–197, mars 1998.
- [154] *Knowledge engineering and management : the CommonKADS methodology*. Cambridge, Mass : MIT Press, 2000.
- [155] G. Schreiber *et al.*, *Knowledge Engineering and Management : The CommonKADS Methodology*. The MIT Press, 1999. [En ligne]. Disponible : <https://direct.mit.edu/books/book/3278/knowledge-engineering-and-managementthe-commonkads>
- [156] R. Plant et R. Gamble, “Methodologies for the development of knowledge-based systems, 1982–2002,” *The Knowledge Engineering Review*, vol. 18, n<sup>o</sup>. 1, p. 47–81, janv. 2003.
- [157] P. J. Lovett, A. Ingram et C. N. Bancroft, “Knowledge-based engineering for smes - a methodology,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 107, p. 384–389, nov. 2000.
- [158] E. Jayakiran Reddy, C. N. V. Sridhar et V. Pandu Rangadu, “Knowledge based engineering : Notion, approaches and future trends,” *American Journal of Intelligent Systems*, p. 17, 2015.
- [159] W. Skarka, “Application of moka methodology in generative model creation using catia,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 20, n<sup>o</sup>. 5, p. 677–690, Aug 2007.
- [160] G. L. Rocca et M. V. Tooren, “Enabling distributed multi-disciplinary design of complex products : a knowledge based engineering approach,” *J. of Design Research*, vol. 5, n<sup>o</sup>. 3, p. 333, 2007.

- [161] A. Morris *et al.*, “Mob - a european project on multidisciplinary design optimisation,” Jan 2004, p. 14.
- [162] G. La Rocca, T. Langen et Y. Brouwers, “The design and engineering engine. towards a modular system for collaborative aircraft design,” vol. 5, 01 2012, p. 13.
- [163] R. Curran *et al.*, “A multidisciplinary implementation methodology for knowledge based engineering : Knomad,” *Expert Systems with Applications*, vol. 37, n<sup>o</sup>. 11, p. 7336–7350, Nov 2010.
- [164] J. Stjepandić *et al.*, “Design process acceleration by knowledge-based engineering in automative and aerospace industry,” D. Marjanovic *et al.*, édit., Dubrovnik, Croatia, mai 2014, p. 1915–1924. [En ligne]. Disponible : <https://www.designsociety.org/publication/35333/DESIGN+PROCESS+ACCELERATION+BY+KNOWLEDGE-BASED+ENGINEERING+IN+AUTOMOTIVE+AND+AEROSPACE+INDUSTRY>
- [165] S. Quintana-Amate *et al.*, “A new knowledge sourcing framework for knowledge-based engineering : An aerospace industry case study,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 104, p. 35–50, Feb 2017.
- [166] S. Quintana-Amate, P. Bermell-Garcia et A. Tiwari, “Transforming expertise into knowledge-based engineering tools : A survey of knowledge sourcing in the context of engineering design,” *Knowledge-Based Systems*, vol. 84, p. 89–97, Aug 2015.
- [167] K. Patil *et al.*, “Developing an integrated design framework using python scripting for parametric cad modelling of flange coupling,” *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, p. 1–12, 01 2024.
- [168] J. R. Esanakula, K. R. G et R. D, “Automated cad modeling of universal coupling components : A case study,” *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 72, n<sup>o</sup>. 3, p. 106–115, mars 2024.
- [169] S. Nambiar *et al.*, “Multidisciplinary automation in design of turbine vane cooling channels,” *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*, vol. 9, n<sup>o</sup>. 1, p. 7, févr. 2024.
- [170] N. Kuelper *et al.*, “Model-based framework for data and knowledge-driven systems architecting demonstrated on a hydrogen-powered concept aircraft,” vol. 33, Honolulu, HI, USA, juill. 2023, p. 666–688. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1002/iis2.13045>
- [171] E. Nordvall, A. Wiberg et M. Tarkian, “Knowledge-based engineering and computer vision for configuration-based substation design,” *Frontiers in Mechanical Engineering*, vol. 9, p. 1154316, avr. 2023.
- [172] E. Rigger, K. Shea et T. Stanković, “Method for identification and integration of design automation tasks in industrial contexts,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 52, p. 101558, avr. 2022.
- [173] A. Ortner-Pichler et C. Landschützer, “Integration of parametric modelling in web-based knowledge-based engineering applications,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 51, p. 101492, janv. 2022.
- [174] X. Long *et al.*, “A knowledge-based automated design system for mechanical products based on a general knowledge framework,” *Expert Systems with Applications*, vol. 178, p. 114960, sept. 2021.
- [175] M. Häußler et A. Borrmann, “Knowledge-based engineering in the context of railway design by integrating bim, bpmn, dmn and the methodology for knowledge-based engineering applications (moka),” *Journal of Information Technology in Construction*, vol. 26, p. 193–226, mai 2021.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [176] C. A. Rivera *et al.*, “Industrial design of electric machines supported with knowledge-based engineering systems,” *Applied Sciences*, vol. 11, n<sup>o</sup>. 1, p. 294, déc. 2020.
- [177] R. J. Machchhar, “Automated model generation and pre-processing to aid simulation-driven design,” Thèse de doctorat, juin 2020.
- [178] A. Vergnano, F. Gherardini et F. Leali, “The systematic design of industrial products through design archetypes : An application on mechanical transmissions,” *Applied Sciences*, vol. 10, n<sup>o</sup>. 7, p. 2277, mars 2020.
- [179] E. Rigger *et al.*, “Estimating the impact of design automation : The influence of knowledge on potential estimation,” *Proceedings of the Design Society : International Conference on Engineering Design*, vol. 1, n<sup>o</sup>. 1, p. 1943–1952, juill. 2019.
- [180] P.-J. Proesmans, “Preliminary propulsion system design and integration for a box-wing aircraft configuration - a knowledge based engineering approach,” déc. 2019, publisher : Unpublished. [En ligne]. Disponible : <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.24359.78242>
- [181] P. Kestel *et al.*, “Ontology-based approach for the provision of simulation knowledge acquired by data and text mining processes,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 39, p. 292–305, janv. 2019.
- [182] M. Mcharek *et al.*, “Knowledge sharing for mechatronic systems design and optimization,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, n<sup>o</sup>. 11, p. 1365–1370, 2018.
- [183] P. Zawadzki, *Methodology of KBE System Development for Automated Design of Multivariant Products*, ser. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham : Springer International Publishing, 2018, p. 239–248. [En ligne]. Disponible : [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-68619-6\\_23](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-68619-6_23)
- [184] H. Li et R. Lachmayer, “Generative design approach for modeling creative designs,” *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, vol. 408, p. 012035, oct. 2018.
- [185] A. Durupt *et al.*, “An extended framework for knowledge modelling and reuse in reverse engineering projects,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, vol. 233, n<sup>o</sup>. 5, p. 1377–1389, avr. 2019.
- [186] H. Rowson *et al.*, *Knowledge Capture and Reuse Through Expert’s Activity Monitoring in Engineering Design*, ser. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Cham : Springer International Publishing, 2018, vol. 540, p. 621–630. [En ligne]. Disponible : [http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-01614-2\\_57](http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-01614-2_57)
- [187] E. Jayakiran Reddy, N. Venkatachalapathi et V. Pandu Rangadu, “Development of an approach for knowledge-based system for cad modelling,” dans *Materials Today : Proceedings*, vol. 5, 2018, p. 13375–13382. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785318305339>
- [188] E. Jayakiran Reddy et V. Pandu Rangadu, “Development of knowledge based parametric cad modeling system for spur gear : An approach,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, n<sup>o</sup>. 4, p. 3139–3149, déc. 2018.
- [189] N. Sapidis et I. Chatziparasidis, “Framework to automate mechanical-system design using multiple product-models and assembly feature technology,” *International Journal of Product Life-cycle Management*, vol. 10, p. 124, 01 2017.
- [190] A. Raju Kulkarni, M. Hoogreef et G. La Rocca, “Combining semantic web technologies and kbe to solve industrial mdo problems,” dans *18th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis*

- and Optimization Conference*. Denver, Colorado : American Institute of Aeronautics and Astronautics, juin 2017. [En ligne]. Disponible : <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2017-3823>
- [191] J. Johansson, “Analysing engineering knowledge in cad-models and spread sheets using graph theory and filtering,” *Advances in Transdisciplinary Engineering*, vol. 24th ISPE International Conference on Transdisciplinary Engineering (TE2017) : Transdisciplinary Engineering : A Paradigm Shift, n<sup>o</sup>. 5, p. 629–638, 2017.
- [192] C. Johansson, T. Larsson et S. Tatipala, “Product-service systems for functional offering of automotive fixtures : Using design automation as enabler,” *Procedia CIRP*, vol. 64, p. 411–416, 2017.
- [193] J. Olofsson *et al.*, “A methodology for microstructure-based structural optimization of cast and injection moulded parts using knowledge-based design automation,” *Advances in Engineering Software*, vol. 109, p. 44–52, juill. 2017.
- [194] E. Jayakiran Reddy, C. N. V. Sridhar et V. Pandu Rangadu, *Research and Development of Knowledge Based Intelligent Design System for Bearings Library Construction Using SolidWorks API*, ser. Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham : Springer International Publishing, 2016, vol. 385, p. 311–319. [En ligne]. Disponible : [https://link.springer.com/10.1007/978-3-319-23258-4\\_27](https://link.springer.com/10.1007/978-3-319-23258-4_27)
- [195] J. R. Esanakula, C. Sridhar et V. P. Rangadu, *Development of KBS for CAD modeling of a two wheeler IC Engine Connecting Rod : An approach*, ser. Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham : Springer International Publishing, 2016, vol. 530, p. 597–606. [En ligne]. Disponible : [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-47952-1\\_48](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-47952-1_48)
- [196] A. E. Ascheri *et al.*, “A knowledge-based framework for automated layout design in an industrial environment,” *International Journal of Computer Applications in Technology*, vol. 54, n<sup>o</sup>. 3, p. 171, 2016.
- [197] R. Raffaelli, P. Cicconi et M. Germani, “Automation of drafting execution by schemes definitions and feature recognition,” *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 13, n<sup>o</sup>. 4, p. 459–470, juill. 2016.
- [198] V. Tiwari, P. K. Jain et P. Tandon, “Design decision automation support through knowledge template cad model,” *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 12, n<sup>o</sup>. 1, p. 96–103, janv. 2015.
- [199] A. Ascheri *et al.*, “Automatic configuration of a powertrain assembly line layout based on a kbe approach,” dans *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*. Barcelona, Spain : IEEE, sept. 2014, p. 1–4. [En ligne]. Disponible : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7005294/>
- [200] —, “Feasibility of an assembly line layout automatic configuration based on a kbe approach,” dans *Proceedings of the 2014 International Conference on Innovative Design and Manufacturing (ICIDM)*. Montreal, QC, Canada : IEEE, août 2014, p. 324–329. [En ligne]. Disponible : <http://ieeexplore.ieee.org/document/6912715/>
- [201] J. Johansson, “Howtomatic© suite : A novel tool for flexible design automation,” *Advances in Transdisciplinary Engineering*, n<sup>o</sup>. 2, p. 327–336, 2015.
- [202] K. Efthymiou *et al.*, “On knowledge reuse for manufacturing systems design and planning : A semantic technology approach,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 8, p. 1–11, janv. 2015.

- [203] G. Colombo *et al.*, “An approach to integrate numerical simulation within kbe applications,” *International Journal of Product Development*, vol. 20, n<sup>o</sup>. 2, p. 107, 2015.
- [204] D. Potočnik, B. Dolšak et M. Ulbin, “An automated design system for compound washer dies,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 35, n<sup>o</sup>. 3, p. 293–304, oct. 2013.
- [205] V. Tiwari, P. K. Jain et P. Tandon, “Design process automation support through knowledge base engineering,” dans *Proceedings of the World Congress on Engineering*, vol. 2, London, UK, 2013, p. 737–742.
- [206] V. Naranje et S. Kumar, “A knowledge-based system for strip-layout design for progressive deep drawing dies,” *International Journal of Computer Applications in Technology*, vol. 48, n<sup>o</sup>. 3, p. 222, 2013.
- [207] A. Corallo *et al.*, “Optimising the design of gearshafts with knowledge-based engineering (kbe) : an application to aircraft engines,” *International Journal of Product Development*, vol. 13, n<sup>o</sup>. 3, p. 185, 2011.
- [208] —, “Enhancing product development through knowledge-based engineering (kbe) : A case study in the aerospace industry,” *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 20, n<sup>o</sup>. 8, p. 1070–1083, oct. 2009.
- [209] A. Van der Laan, “Knowledge based engineering support for aircraft component design,” Thèse de doctorat, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, 2008.
- [210] S. Danjou, N. Lupa et P. Koehler, “Approach for automated product modeling using knowledge-based design features,” *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 5, n<sup>o</sup>. 5, p. 622–629, janv. 2008.
- [211] C. Emberey *et al.*, “Application of knowledge engineering methodologies to support engineering design application development in aerospace,” dans *7th AIAA ATIO Conf, 2nd CEIAT Int’l Conf on Innov and Integr in Aero Sciences, 17th LTA Systems Tech Conf ; followed by 2nd TEOS Forum*. Belfast, Northern Ireland : American Institute of Aeronautics and Astronautics, sept. 2007. [En ligne]. Disponible : <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2007-7708>
- [212] A. H. van der Laan et M. Van Tooren, “Parametric modeling of movables for structural analysis,” *Journal of Aircraft*, vol. 42, n<sup>o</sup>. 6, p. 1605–1613, nov. 2005.
- [213] L. Fortuin, “Performance indicators — why, where and how?” *European Journal of Operational Research*, vol. 34, n<sup>o</sup>. 1, p. 1–9, 1988. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377221788904493>
- [214] M. Goold et J. J. Quinn, “The paradox of strategic controls,” *Strategic Management Journal*, vol. 11, n<sup>o</sup>. 1, p. 43–57, janv. 1990.
- [215] S. Globerson, “Issues in developing a performance criteria system for an organization,” *International Journal of Production Research*, vol. 23, n<sup>o</sup>. 4, p. 639–646, janv. 1985.
- [216] M. B. Bjerke et R. Renger, “Being smart about writing smart objectives,” *Evaluation and Program Planning*, vol. 61, p. 125–127, avr. 2017.
- [217] A. Warniez *et al.*, “Metrics generation process for mechatronics,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 28, n<sup>o</sup>. 1, p. 50–60, févr. 2016.
- [218] A. Babu et N. Suresh, “Project management with time, cost, and quality considerations,” *European Journal of Operational Research*, vol. 88, n<sup>o</sup>. 2, p. 320–327, janv. 1996.
- [219] J. M. Costa *et al.*, “What to measure for success in lean system engineering programs ?” *Procedia Computer Science*, vol. 28, p. 789–798, 2014.

- [220] L. Hvam, A. Haug et N. H. Mortensen, "Assessment of benefits from product configuration systems," dans *Proceedings of Workshop on Configuration : 19. Europe Conference on Artificial Intelligence (ECAI)*, Lisbon, Portugal, août 2010. [En ligne]. Disponible : <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/4895107/Assessmentof+BenefitsfromProductConfiguration.pdf>
- [221] N. Do, "Application of olap to a pdm database for interactive performance evaluation of in-progress product development," *Computers in Industry*, vol. 65, n° 4, p. 636–645, mai 2014.
- [222] E. Rigger *et al.*, "A top-down method for the derivation of metrics for the assessment of design automation potential," *Journal of Engineering Design*, vol. 31, n° 2, p. 69–99, févr. 2020.
- [223] M. Kreimeyer et U. LINDEMANN, *Complexity Metrics in Engineering Design*, 01 2011.
- [224] E. Kroll et G. Weisbrod, "Testing and evaluating the applicability and effectiveness of the new idea-configuration-evaluation (ice) method of conceptual design," *Research in Engineering Design*, vol. 31, n° 1, p. 103–122, janv. 2020.
- [225] V. Chulvi *et al.*, "Comparison of the degree of creativity in the design outcomes using different design methods," *Journal of Engineering Design - J ENGINEERING DESIGN*, vol. 23, p. 241–269, 04 2012.
- [226] C. Cerdan *et al.*, "Proposal for new quantitative eco-design indicators : a first case study," *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, n° 18, p. 1638–1643, déc. 2009.
- [227] I. I. Issa *et al.*, "Leading product-related environmental performance indicators : a selection guide and database," *Journal of Cleaner Production*, vol. 108, p. 321–330, déc. 2015.
- [228] S. I. Hallstedt, "Sustainability criteria and sustainability compliance index for decision support in product development," *Journal of Cleaner Production*, vol. 140, p. 251–266, janv. 2017.
- [229] A. Mallalieu *et al.*, "Derive and integrate sustainability criteria in design space exploration of additive manufactured components," *Proceedings of the Design Society*, vol. 3, p. 1197–1206, juill. 2023.
- [230] H. Brezet *et al.*, *Ecodesign : A Promising Approach to Sustainable Production and Consumption*, ser. United Nations publication. United Nations Environment Programme, Industry and Environment, Cleaner Production, 1997. [En ligne]. Disponible : <https://books.google.fr/books?id=WtxpQgAACAAJ>
- [231] L. Fu, P. Jiang et W. Cao, "Modeling and performance analysis of product development process network," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 36, n° 6, p. 1489–1502, nov. 2013.
- [232] T. Browning et S. Eppinger, "Modeling impacts of process architecture on cost and schedule risk in product development," *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 49, n° 4, p. 428–442, nov. 2002.
- [233] F. Yin, Q. Gao et X. Ji, "Performance modelling based on value analysis for improving product development process architecture," *Advances in Production Engineering & Management*, vol. 12, n° 1, p. 17–28, mars 2017.
- [234] H. L. McManus, "Product development value stream mapping (pdvsm) manual release 1.0," sept. 2005. [En ligne]. Disponible : <http://hdl.handle.net/1721.1/81908>
- [235] E. Rigger, C. Münzer et K. Shea, "Estimating the potential of state of the art design automation - tasks, methods, and benefits," D. Marjanovic *et al.*, édit., vol. 1. Zagreb : Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2016, Conference Paper, p. 421 – 432.
- [236] E. Rigger et T. Vosgien, "Design automation state of practice - potential and opportunities," 2018, p. 441–452. [En ligne]. Dis-

- ponible : <https://www.designsociety.org/publication/40462/DESIGN+AUTOMATION+STATE+OF+PRACTICE+-+POTENTIAL+AND+OPPORTUNITIES>
- [237] E. Rigger, K. Shea et T. Stankovic, “Task categorisation for identification of design automation opportunities,” *Journal of Engineering Design*, vol. 29, n<sup>o</sup>. 3, p. 131–159, mars 2018.
- [238] B. Mulder *et al.*, “A methodological approach for the optimisation of the product development process by the application of design automation,” Aula Conference Centre : Delft, Netherlands, 2015. [En ligne]. Disponible : <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:56436020>
- [239] E. J. Schut, S. Kosman et R. Curran, “A value scan methodology to improve industrial operations,” dans *Concurrent Engineering Approaches for Sustainable Product Development in a Multi-Disciplinary Environment*, J. Stjepandić, G. Rock et C. Bil, édit. London : Springer London, 2013, p. 411–423. [En ligne]. Disponible : [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4426-7\\_36](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4426-7_36)
- [240] M. Dinar *et al.*, *Evaluation of Empirical Design Studies and Metrics*. Cham : Springer International Publishing, 2016, p. 13–39. [En ligne]. Disponible : [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-33781-4\\_2](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-33781-4_2)
- [241] G. Goldschmidt et A. Sever, “From text to design solution : Inspiring design ideas with texts,” *DS 58-9 : Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design*, vol. 9, p. 15–26, 01 2009.
- [242] E. Cherry et C. Latulipe, “Quantifying the creativity support of digital tools through the creativity support index,” *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, vol. 21, n<sup>o</sup>. 4, p. 1–25, août 2014.
- [243] G. Ghasemi *et al.*, “Simulation model selection process using complexity measurement,” dans *2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. Auckland, New Zealand : IEEE, août 2023, p. 1–6. [En ligne]. Disponible : <https://ieeexplore.ieee.org/document/10260593/>
- [244] G. Popovics et L. Monostori, “An approach to determine simulation model complexity,” dans *Procedia CIRP*, vol. 52, 2016, p. 257–261. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221282711630871X>
- [245] U. Lindemann, M. Maurer et T. Braun, *Structural Complexity Management : An Approach for the Field of Product Design*. Springer Berlin Heidelberg, 2008. [En ligne]. Disponible : <https://books.google.fr/books?id=O9QYYtOAZ0IC>
- [246] R. Ahmed, M. Shah et M. Umar, “Concepts of simulation model size and complexity,” *International Journal of Simulation Modelling*, vol. 15, n<sup>o</sup>. 2, p. 213–222, juin 2016.
- [247] L. Chwif, M. Barretto et R. Paul, “On simulation model complexity,” dans *2000 Winter Simulation Conference Proceedings (Cat. No.00CH37165)*, vol. 1. Orlando, FL, USA : IEEE, 2000, p. 449–455. [En ligne]. Disponible : <http://ieeexplore.ieee.org/document/899751/>
- [248] K. Gericke, C. Eckert et M. Stacey, “Elements of a design method – a basis for describing and evaluating design methods,” *Design Science*, vol. 8, p. e29, 2022.
- [249] R. Sargent, “Verification and validation of simulation models,” vol. 37, 01 2011, p. 166 – 183.
- [250] *Guide : Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations (AIAA G-077-1998(2002))*. [En ligne]. Disponible : <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/4.472855.001>
- [251] A. Ryberg *et al.*, *Metamodel-based Multidisciplinary Design Optimization for Automotive Applications*. Division of Solid Mechanics [Department of Management and Engineering],

- Linköping University, 2012. [En ligne]. Disponible : [https://books.google.fr/books?id=W\\_bjjwEACAAJ](https://books.google.fr/books?id=W_bjjwEACAAJ)
- [252] K. Y. Wong *et al.*, “Knowledge management performance measurement : measures, approaches, trends and future directions,” *Information Development*, vol. 31, n<sup>o</sup>. 3, p. 239–257, juin 2015.
- [253] T. Gao, Y. Chai et Y. Liu, “A review of knowledge management about theoretical conception and designing approaches,” *International Journal of Crowd Science*, vol. 2, n<sup>o</sup>. 1, p. 42–51, juill. 2018.
- [254] C. T. Kuah, K. Y. Wong et W. P. Wong, “Monte carlo data envelopment analysis with genetic algorithm for knowledge management performance measurement,” *Expert Systems with Applications*, vol. 39, n<sup>o</sup>. 10, p. 9348–9358, août 2012.
- [255] I. Andone, “Measuring the performance of corporate knowledge management systems,” *Informatica Economica Journal*, vol. 13, n<sup>o</sup>. 4, janv. 2009.
- [256] Y. Wang et J. Zheng, “Knowledge management performance evaluation based on triangular fuzzy number,” dans *Procedia Engineering*, vol. 7, 2010, p. 38–45. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705810010003>
- [257] A.-P. Chen et M.-Y. Chen, “A review of survey research in knowledge management performance measurement : 1995-2004,” 01 2005.
- [258] J. Wang *et al.*, “A synthetic method for knowledge management performance evaluation based on triangular fuzzy number and group support systems,” *Applied Soft Computing*, vol. 39, p. 11–20, févr. 2016.
- [259] Z. Ruihong, “The application of the balanced scorecard in performance assessment of knowledge management,” dans *2010 2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering*, 2010, p. 443–447.
- [260] Y.-L. Wu, X. Wang et H.-S. Wu, “Research on the performance measurement of knowledge management based on principal component analysis,” dans *2009 International Workshop on Intelligent Systems and Applications*. Wuhan, China : IEEE, mai 2009, p. 1–4. [En ligne]. Disponible : <http://ieeexplore.ieee.org/document/5073092/>
- [261] S.-M. Tseng, “Knowledge management system performance measure index,” *Expert Systems with Applications*, vol. 34, n<sup>o</sup>. 1, p. 734–745, 2008. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417406003241>
- [262] K. Wheeler, “Methodological support for knowledge based engineering application development,” mars 2020. [En ligne]. Disponible : <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:01ee12dd-3941-45e0-9baf-d58ff7b823e0?collection=education>
- [263] S. Škec, P. Cash et M. Štorga, “A dynamic approach to real-time performance measurement in design projects,” *Journal of Engineering Design*, vol. 28, n<sup>o</sup>. 4, p. 255–286, avr. 2017.
- [264] M. Cederfeldt et F. Elgh, “Design automation in smes - current state, potentiel, need and requirements,” dans *DS 35 : Proceedings ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design*, A. Samuel et W. Lewis, édit., Melbourne, Australia, août 2005. [En ligne]. Disponible : <https://www.designsociety.org/publication/23007/DESIGN+AUTOMATION+IN+SMES+%E2%80%93+CURRENT+STATE%2C+POTENTIAL%2C+NEED+AND+REQUIREMENTS>
- [265] L. P. Chao et K. Ishii, “Design process error proofing : Failure modes and effects analysis of the design process,” *Journal of Mechanical Design*, vol. 129, n<sup>o</sup>. 5, p. 491–501, 07 2006. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1115/1.2712216>

- [266] K. Chang Lee, S. Lee et I. W. Kang, “Kmpi : measuring knowledge management performance,” *Information & Management*, vol. 42, n<sup>o</sup>. 3, p. 469–482, mars 2005.
- [267] R. Hurley et G. T. M. Hult, “Innovation, market orientation, and organizational learning : An integration and empirical examination,” *Journal of Marketing*, vol. 62, 07 1998.
- [268] C. Martinez-Cruz, I. J. Blanco et M. A. Vila, “Ontologies versus relational databases : are they so different ? a comparison,” *Artificial Intelligence Review*, vol. 38, n<sup>o</sup>. 4, p. 271–290, déc. 2012.
- [269] M. Uschold, “Ontology and database schema : What’s the difference ?” *Applied Ontology*, vol. 10, n<sup>o</sup>. 3–4, p. 243–258, déc. 2015.

## BIBLIOGRAPHIE

---

## Annexe A

# Benchmark de méta-modèles

Benchmark de méta-modèles sur deux critères issue de [15] :

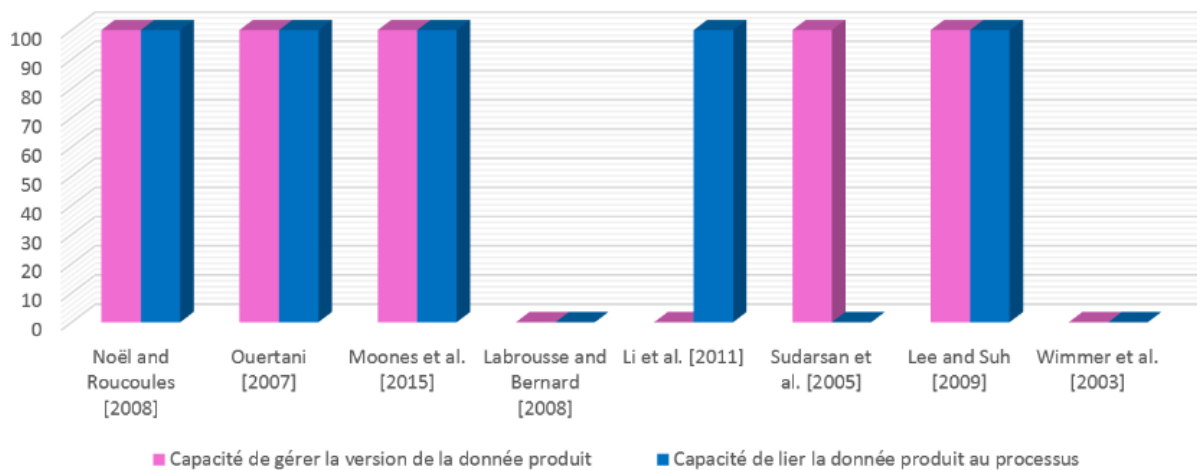


FIGURE A.1 – Comparaison de différents méta-modèles sur les critères de gestion des données produit et sur les liaisons produit aux processus

Benchmark de méta-modèles sur différents critères globaux issue de [15] :

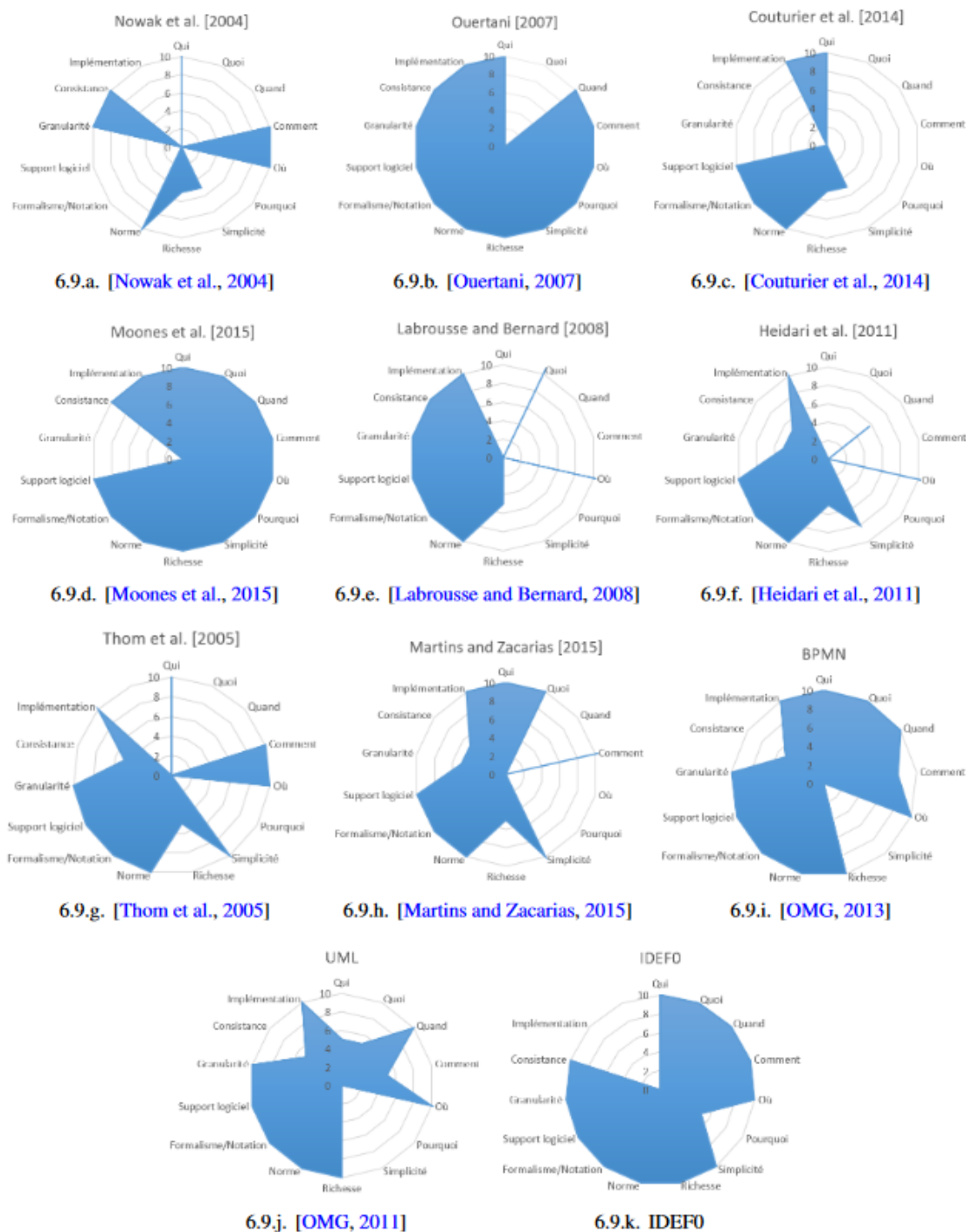


FIGURE A.2 – Comparaison de différents méta-modèles

## Annexe B

# Systèmes de mesure de la performance de la gestion des connaissances

Vue holistique des facteurs influençant la complexité finale d'un modèle de simulation de Ahmed et al. [246] :

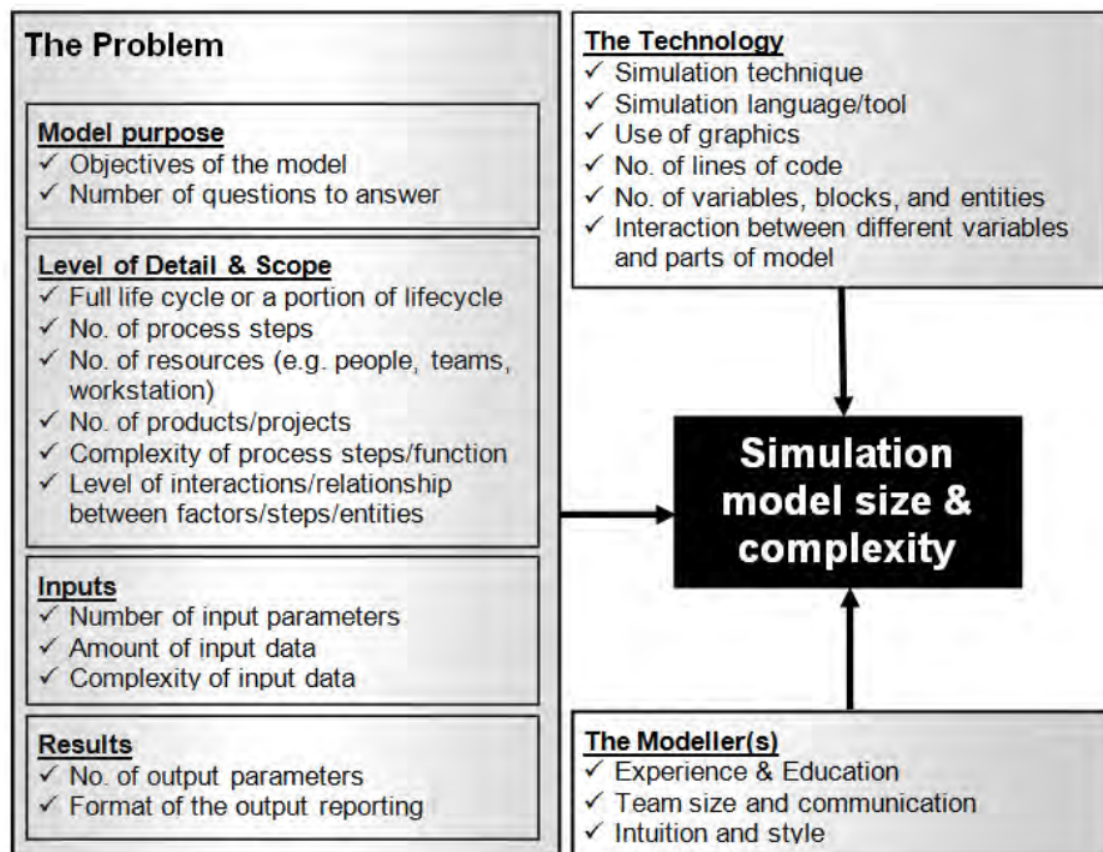


FIGURE B.1 – Origine des modèles de simulation et de leur complexité

Systemes d'évaluation de Wang et al. [258] :

Category	Sub-category	Evaluation index
Process of knowledge management	Knowledge acquisition	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The ability to obtain and refine knowledge</li> <li>• The ability to use stored knowledge and Internet resource</li> </ul>
	Knowledge transfer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Explicit knowledge transfer level</li> <li>• Tacit knowledge transfer level</li> </ul>
	Knowledge creation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The efficiency of new products development</li> <li>• Time efficiency to market</li> <li>• The degree of new knowledge application</li> </ul>
Structure of organizational knowledge	Organizational ability to use knowledge	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The ability to learn new knowledge</li> <li>• The wish to knowledge creation</li> <li>• Knowledge conversion efficiency</li> <li>• Measures taking to bridge knowledge gap</li> </ul>
	Leadership of organization's manager	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Organizational skills</li> <li>• Professional guidance</li> <li>• Decision-making capacity</li> </ul>
	Ability of team members	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The initiative on knowledge comprehension and creation</li> <li>• Communication and presentation</li> </ul>
	Environment to support knowledge management	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The level of digitization and network</li> <li>• The stability of knowledge network</li> </ul>
Economic benefits	Profit level	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selling profits</li> <li>• Net asset profits</li> </ul>
	Income level	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Employee average incomes</li> <li>• THE level of employee ownership</li> </ul>
	Social value	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Share price</li> <li>• Tax</li> </ul>
Efficiency	Customer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The number of customers</li> <li>• Customer satisfaction rate</li> <li>• The loyalty of customers</li> </ul>
	Staff	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The degree of employee's efficiency improvements</li> <li>• Employee satisfaction rate</li> </ul>
	Knowledge utilization	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The yield on knowledge property rights transfer</li> <li>• Duplication amount of knowledge</li> </ul>

FIGURE B.2 – Exemple de système d'évaluation de la performance de la gestion des connaissances

Matrice des indicateurs de performance pour la gestion des connaissances issue de Shannak [19] :

Focus Area	Domain	Performance Indicator	Source
Process	Quality of Knowledge	<ul style="list-style-type: none"> <li>To what extent the employees:               <ul style="list-style-type: none"> <li>consider knowledge in databases useful</li> <li>re-use knowledge</li> </ul> </li> <li>Number of returning users in databases</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Survey</li> <li>Log in database</li> </ul>
	Efficiency due to new routines	<ul style="list-style-type: none"> <li>Number of:               <ul style="list-style-type: none"> <li>calls to support function</li> <li>hours spent with external experts, per month</li> <li>employees participating in this survey</li> </ul> </li> <li>To what extent the employee:               <ul style="list-style-type: none"> <li>experience saved time in finding the correct information/competence due to using the databases</li> <li>consider increased number of orders connected to solutions/success stories</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Survey</li> <li>Log in database</li> </ul>
	Incentives	<ul style="list-style-type: none"> <li>Number of distributed incentives</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manager</li> </ul>
	Knowledge Contributor	<ul style="list-style-type: none"> <li>Occupational title of the Contributor</li> <li>Business Unit, where the Contributor is working</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Log in database</li> </ul>
Human	Knowledge Sharing Attitude	<ul style="list-style-type: none"> <li>To what extent employees feel:               <ul style="list-style-type: none"> <li>comfortable reusing solutions/contributions</li> <li>comfortable sharing their knowledge in order to help others</li> <li>that they save time by using knowledge databases in their daily work</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Survey</li> </ul>
	Knowledge Sharing Activities	<ul style="list-style-type: none"> <li>Number of hours the employees participate in workshops/seminars/networks or other activities, per month</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Survey</li> </ul>
	Use of Participation in Activities	<ul style="list-style-type: none"> <li>To what extent employees consider that participation in activities generates:               <ul style="list-style-type: none"> <li>new relations/contacts</li> <li>experience and more contributions in databases</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Survey</li> </ul>
	Awareness	<ul style="list-style-type: none"> <li>To what extent the employees feel they have been provided with sufficient:               <ul style="list-style-type: none"> <li>information/education for:                   <ul style="list-style-type: none"> <li>the new routines and work procedures</li> <li>the new databases</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Survey</li> </ul>
IT	Active Involvement	<ul style="list-style-type: none"> <li>Number of users</li> <li>Number of:               <ul style="list-style-type: none"> <li>accesses in chosen area, per user</li> <li>returning users in databases</li> <li>solutions contributed, per user</li> <li>success stories contributed, per user</li> <li>lessons learned contributed, per user</li> <li>best practices contributed, per user</li> <li>other contributions, per user</li> </ul> </li> <li>Number of employees who have registered as a member</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Log in database</li> <li>Survey</li> </ul>
	Knowledge Structure	<ul style="list-style-type: none"> <li>Number of communities in databases</li> <li>Number of topics in communities in databases</li> <li>Number of taxonomies in databases</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Log in database</li> </ul>
	Usability	<ul style="list-style-type: none"> <li>To what extent the employees consider:               <ul style="list-style-type: none"> <li>the databases to be user friendly</li> <li>help-instructions in the databases being sufficient</li> <li>it easy finding colleagues with the correct competence</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Survey</li> </ul>

FIGURE B.3 – Exemple de matrice des indicateurs de performance



## Annexe C

# Application KANO

La page d'accueil de l'application KANO est constitué d'un bandeau qui regroupe les onglets vers cette page d'accueil, l'activité 1 qui correspond au calcul des contraintes en torsion d'un arbre composite, l'activité 2 pour le calcul des fréquences d'une ligne de transmission et enfin l'interaction avec la BDD relationnelle qui constitue la BDC de l'application KBE développée.

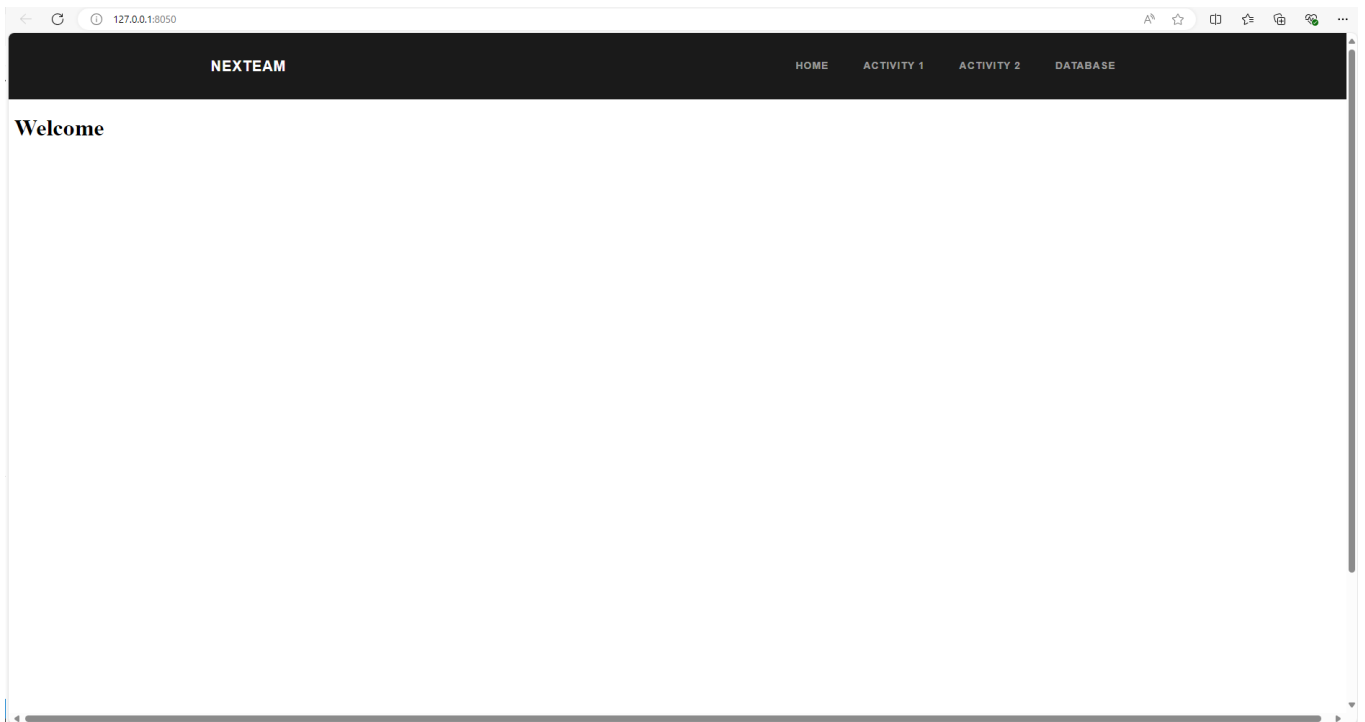


FIGURE C.1 – Capture d'écran de l'application KANO - Page d'accueil

Vient ensuite l'onglet de définition du contexte de réalisation de l'activité. Cet onglet est commun aux deux activités développées et serait le même pour l'ajout de n'importe quelle autre activité en raison de sa structure générale. Cet onglet permet de renseigner les principales informations sur le contexte de l'activité en cours, les QQQCOP, comme l'utilisateur, les dates de début et de fin d'activité, le projet et processus dans lesquels cette réalisation s'inscrit ou encore la justification de réalisation de l'activité.

The screenshot shows a web application interface for 'NEXTEAM'. The browser address bar shows '127.0.0.1:8050/activity1'. The navigation menu includes 'HOME', 'ACTIVITY 1', 'ACTIVITY 2', and 'DATABASE'. The main content area is titled 'Toggle Context Manager' and contains several input fields and text areas:

- Activity's Creator Name:
- Activity's User Name:
- Predictive Cost:
- Effective Cost:
- Select Process:
- Select project:
- Estimated starting Date:
- Estimated ending Date:
- Why?:
- Remark?:
- Submit:

At the bottom, there is a section titled 'UNDERSTANDING PARAMETERS' with the following fields:

total_length :	500	fixation_holes_diameter :	10	sleeve_length :	65	G12 :	3830	Yt :	27
		non_fixation_holes_number :	4	front_patch :		G1Z :	3830	Yc :	87

FIGURE C.2 – Capture d'écran de l'application KANO - Données de contexte

La page pour réaliser l'activité de calcul des contraintes en torsion d'un arbre composite est d'abord structurée autour des paramètres à renseigner pour définir les propriétés, les dimensions et le chargement de l'arbre, entre autres, visible sur la figure C.3. Toutes les données ont été anonymisées par souci de confidentialité des travaux. Un onglet permet également d'accéder aux informations de la méthode pour détailler les paramètres à renseigner et ce qui est réalisé par l'intermédiaire de l'outil. Une fois l'ensemble des paramètres renseignés, et si le contexte a été complété par l'utilisateur, le bouton « Submit » lance la génération du modèle, son calcul ainsi que son post-traitement.

The screenshot shows the NEXTEAM application interface. At the top, there is a navigation bar with 'HOME', 'ACTIVITY 1', 'ACTIVITY 2', and 'DATABASE'. Below this is a 'Toggle Context Manager' button. The main area is divided into several columns of 'PARAMETRE' input fields. On the left, there is a section titled 'UNDERSTANDING PARAMETERS' with a list of 10 parameters. The main grid contains 4 columns of 5 parameters each, with some parameters having numerical values or arrays. On the right side, there are dropdown menus for 'HILL' and 'model\_title', and text input fields for 'arbre\_demo\_these' and 'folder\_path'. At the bottom right, there is a 'SUBMIT' button.

FIGURE C.3 – Capture d'écran de l'application KANO - Calcul des contraintes de torsion - définition des paramètres de l'arbre

L'image C.4 ci-dessous est la suite de l'image C.3 précédente, qui représente la même page de l'activité sur le calcul des contraintes de torsion. On retrouve dans cette deuxième partie les résultats post-traités dans deux figures et deux tableaux. Les figures offrent une visualisation directe des résultats du modèle EF sans avoir besoin d'ouvrir le logiciel, et les résultats des principales contraintes d'intérêt pour procéder au prédimensionnement sont accessibles dans les tableaux en dessous.

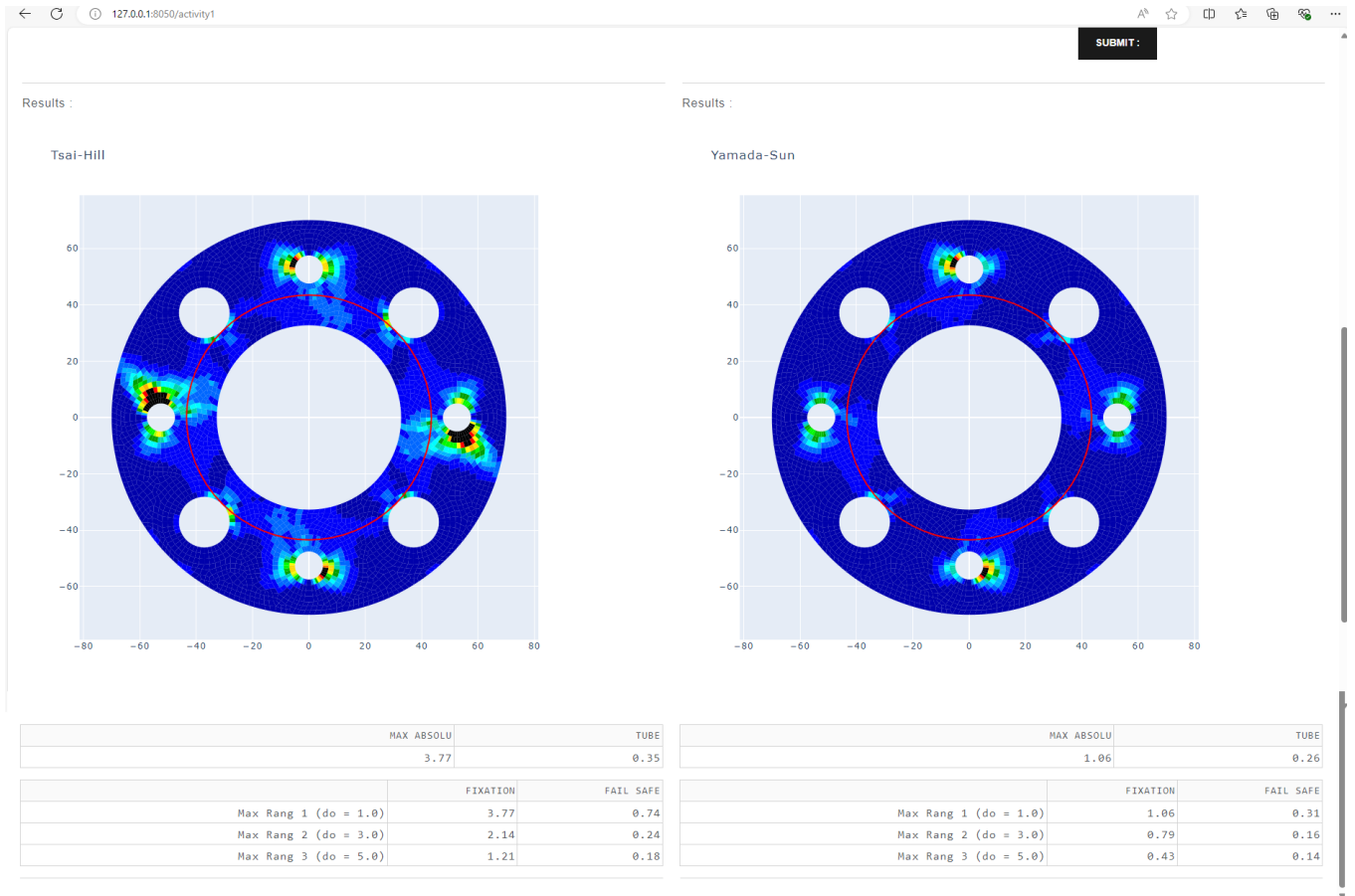


FIGURE C.4 – Capture d'écran de l'application KANO - Calcul des contraintes de torsion - résultats

La figure C.5 montre l'ajout d'un des cinq composants définis dans l'activité de calcul des modes propres. Chacun de ces composants peut être ajouté en série à la définition de ligne de transmission qui se construit par conception modulaire. Le calcul et la récupération des résultats sont déclenchés par le bouton « Submit » tout comme dans le cas de l'autre activité implémentée.

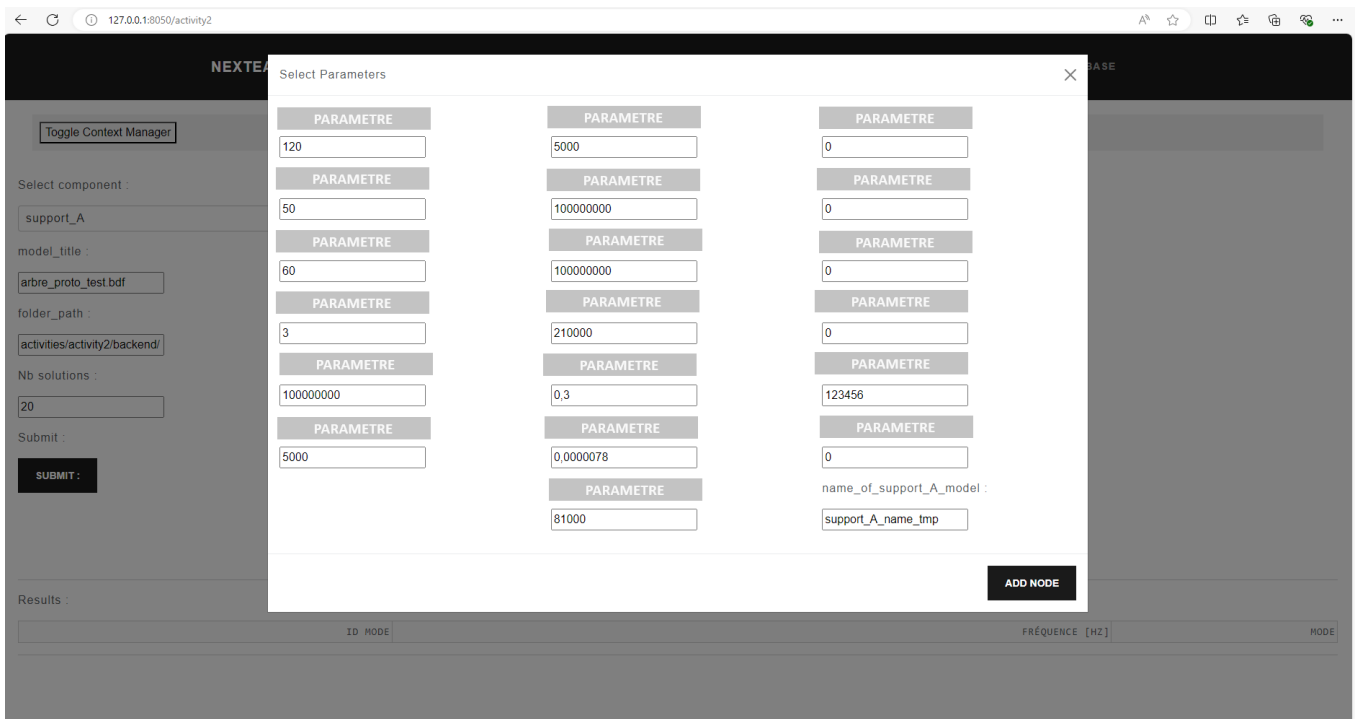


FIGURE C.5 – Capture d'écran de l'application KANO - Calcul des fréquences - définition de la ligne de transmission

La suite de la page C.5 après calcul est présentée sur la figure C.6 ci-dessous. On y retrouve l'ensemble des modes calculés ainsi que le type de mode identifié pour la configuration donnée, qui pour cet exemple est la même que celle présentée en figure 4.8. Les résultats sont présentés dans un tableau de synthèse, et le détail sur la forme des modes reste cependant à visualiser par l'utilisation du logiciel.

The screenshot shows the NEXTEAM application interface. At the top, there is a navigation bar with 'HOME', 'ACTIVITY 1', 'ACTIVITY 2', and 'DATABASE'. Below this, there is a 'Toggle Context Manager' button. The main area is divided into a control panel on the left and a 3D model on the right. The control panel includes a 'Select component' dropdown, a 'model\_title' input field with 'def\_ligne\_test\_these', a 'folder\_path' input field with 'C:\Users\sebastien.bariet-b', and a 'Nb solutions' input field with '20'. There is a 'SUBMIT' button and 'Remove Last' and 'Reset' buttons below the model. The 3D model shows a mechanical assembly with various components highlighted in different colors (red, blue, yellow, green). Below the model, there is a 'Results' section with a table of calculated modes.

ID MODE	FRÉQUENCE [HZ]	MODE
1	0	Torsion
2	53.78	Axial
3	107.1	Flexion
4	107.1	Flexion
5	134.67	Flexion
6	134.67	Flexion
7	164.59	Flexion
8	164.59	Flexion
9	237.35	Flexion
10	237.35	Flexion
11	336.02	Flexion
12	336.02	Flexion
13	380.13	Flexion
14	380.13	Flexion
15	598.28	Axial
16	598.71	Flexion
17	598.71	Flexion
18	700.94	Flexion
19	700.94	Flexion
20	744.71	Torsion

FIGURE C.6 – Capture d'écran de l'application KANO - Calcul des fréquences - résultats

Le dernier onglet de l'application KANO concerne la BDC, avec laquelle l'utilisateur peut interagir de deux façons différentes. Tout d'abord en analysant directement le contenu des tables de la BDD relationnelle tel que c'est présenté sur la figure C.7 suivante. Cette approche offre à l'utilisateur de loisir d'explorer n'importe quelle donnée renseignée dans les tables de la BDD à la recherche d'informations qui pourraient lui être utiles à réutiliser dans le cadre d'autres activités.

**NUMBER OF TABLES: 15**

ID_ACTIVITY	ACTIVITY_NAME	ID_PROJECT	ID_PROCESS	REAL_START_DATE	REAL_END_DATE	USER	ACTIVITY_JUSTIFICATION
1	Build 2D FEM model of composite shaft	3	8	2024-06-03 16:56:20	2024-06-03 16:56:22	first_name.last_name	TBD
2	Build 2D FEM model of composite shaft	3	8	2024-06-03 16:58:17	2024-06-03 16:58:18	first_name.last_name	TBD
3	Build 2D FEM model of composite shaft	3	8	2024-06-03 17:01:52	2024-06-03 17:01:54	first_name.last_name	TBD
4	Build 2D FEM model of composite shaft	3	8	2024-06-03 17:03:30	2024-06-03 17:03:31	first_name.last_name	TBD
5	Build 2D FEM model of composite shaft	3	8	2024-06-03 17:05:11	2024-06-03 17:05:13	first_name.last_name	TBD
6	Build 2D FEM model of composite shaft	3	8	2024-06-03 17:50:20	2024-06-03 17:50:22	first_name.last_name	TBD
7	Build 2D FEM model of composite shaft	3	8	2024-06-03 17:54:14	2024-06-03 17:54:16	first_name.last_name	TBD
8	Torsional stress calculations and post-processing of results	3	8	2024-06-03 17:54:14	2024-06-03 17:54:52	first_name.last_name	TBD
9	Build Shaft B 1D model	1	9	2024-06-05 14:27:05	2024-06-05 14:27:06	seb blb	test
10	Build Shaft A 1D model	1	9	2024-06-05 14:27:05	2024-06-05 14:27:07	seb blb	test
11	Build Coupling A 1D model	1	9	2024-06-05 14:27:05	2024-06-05 14:27:08	seb blb	test
12	Build Interface A 1D model	1	9	2024-06-05 14:27:05	2024-06-05 14:27:09	seb blb	test

FIGURE C.7 – Capture d'écran de l'application KANO - Accès à la base de données

Enfin, la deuxième et dernière façon que l'utilisateur a d'interagir avec la BDD est par l'intermédiaire de requêtes SQL. Un exemple simple est donné sur la figure C.8 pour récupérer l'ensemble des données contenues dans la table activité, ce qui permet la remontée d'information dans l'affichage en dessous.

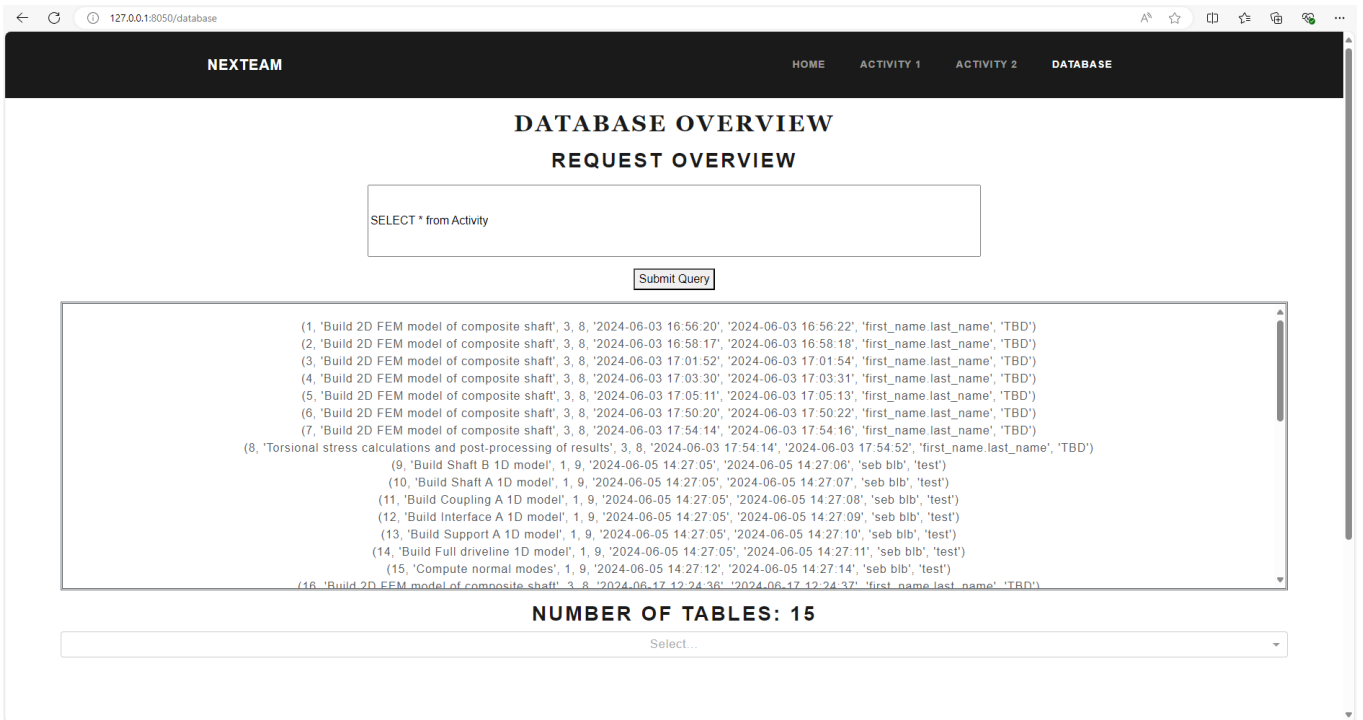


FIGURE C.8 – Capture d'écran de l'application KANO - Requête à la base de données



**Résumé :** Ces travaux de thèse s'intègrent dans un contexte de développement produit au sein de l'industrie aéronautique. Pour maintenir ou accroître leur compétitivité, les entreprises cherchent à valoriser les connaissances à leur disposition dans l'objectif d'accélérer les phases de conception et de diminuer les coûts de développement. Les systèmes d'ingénierie basés sur la connaissance (KBE) sont étudiés dans la littérature depuis plusieurs décennies et promettent des gains de temps, l'automatisation de tâches répétitives et à faible valeur ajoutée ou encore l'optimisation de la conception. Cependant, ces gains ne sont pas démontrés dans un environnement industriel en raison des difficultés à intégrer ces outils dans ces environnements complexes. Les approches KBE reposent sur la capitalisation des connaissances, dont l'enjeu est de parvenir à les structurer, de façon à construire une base de connaissances propres à l'industriel qu'il peut valoriser en tant que ressource au service des futures conceptions. De plus, il n'existe actuellement pas de méthode explicite pour implémenter ce type de solution dans un processus de développement produit (PDP). Les problématiques concernent donc d'une part l'identification et l'implémentation des outils KBE adaptés dans un environnement industriel, mais aussi l'évaluation de la performance apportée par ces outils d'autre part. Ces travaux se sont orientés vers la définition d'un méta-modèle de capitalisation processus pour structurer les connaissances durant le PDP et pouvant s'intégrer dans un outil KBE. Le deuxième axe est porté sur la construction d'un système de mesure pour quantifier les gains de performance qu'apportent le développement et l'utilisation d'outils KBE à l'échelle du PDP. Ces propositions sont illustrées sur le cas industriel de développement de lignes de transmission mécanique, composées d'arbres de transmission en composite, au moyen d'une application métier KBE, nommée KANO, qui a été développée à cette fin.

**Mots clés :** Ingénierie basée sur les connaissances, Processus de conception, Capitalisation des connaissances, Méta-modèle de capitalisation, Traçabilité des processus, Évaluation de la performance, Aide à la conception, Modélisation des processus.

**Abstract :** This thesis is being conducted in the context of product development in the aeronautics industry. To maintain or increase their competitiveness, companies are seeking to leverage the knowledge at their disposal, with the aim of accelerating design phases and reducing development costs. Knowledge-based engineering (KBE) systems have been studied in the literature for several decades, and promise to save time, automate repetitive and low-value-added tasks and optimize design. However, these gains have not been demonstrated in an industrial environment, due to the difficulties of integrating these tools into complex environments. KBE approaches are based on the capitalization of knowledge, the challenge being to structure it in such a way as to build a knowledge base specific to the industrial company, which it can use as a resource for future designs. What's more, there is currently no generic approach or tools for implementing this type of solution in a product development process (PDP). The problems therefore concern, on the one hand, the identification and implementation of generic tools for implementing KBE tools in an industrial environment, and on the other hand, the evaluation of the performance provided by these tools. This work focused on the definition of a process capitalization meta-model for structuring knowledge during the PDP, which could be integrated into a KBE tool. The second focus is on the construction of a measurement system to quantify the performance gains achieved by the development and use of KBE tools at PDP level. These proposals are illustrated on the industrial case of the development of mechanical transmission lines, made up of composite drive shafts, using a KBE business application, named KANO, which has been developed for this purpose.

**Keywords :** Knowledge-based engineering, Design process, Knowledge capitalization, Capitalization meta-model, Process traceability, Performance evaluation, Design support, Process modeling.