

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
[Laboratoire de Conception de Produits et Innovation (LCPI EA3927) &
Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Physique et Numériques (LISPEN
EA7515) – Campus de Paris et d'Aix-en-Provence]

THÈSE

présentée par : **Armand HUET**

soutenue le : **13 Avril 2022**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Sciences de la conception**

Proposition d'un assistant intelligent dédié aux règles de conception pour l'industrie manufacturière

THÈSE dirigée par : **Frédéric SEGONDS**

Co-dirigée par : **Philippe VERON**

Co-encadrée par : **Romain PINQUIE**

Jury

Mme. Claire LARTIGUE, Professeur des Universités, LURPA, Université Paris Sud

M. Alexandre DURUPT, Maître de conférences HDR, Laboratoire Roberval, UTC

M. Samuel GOMES, Professeur des Universités, ICB, UTBM

M. Améziane AOUSSAT, Professeur des Universités, LCPI, Arts et Métiers

M. Frédéric SEGONDS, Maître de conférences HDR, LCPI, Arts et Métiers

M. Philippe VERON, Professeur des Universités, LISPEN, Arts et Métiers

M. Romain PINQUIE, Maître de conférences, G-SCOP, Université Grenoble Alpes

M. Benjamin DEGUILHEM, Docteur, CAPGEMINI engineering

M. Antoine MALLET, Ingénieur, CAPGEMINI engineering

Présidente

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

Invité

Sommaire

Sommaire	2
Remerciements	5
Introduction.....	7
A. Présentation générale	7
B. Contexte	8
I. Le processus de conception.....	8
II. Les règles de conception dans l'industrie manufacturière	10
C. Question de recherche	12
D. Positionnement de la recherche	12
1.1.1 Communauté internationale.....	12
1.1.2 Communauté Française	13
1.1.3 Cadre de la thèse.....	14
E. Structure du mémoire	17
Chapitre 1 _ Etat de l'art	18
1.1 Nécessité d'assistants cognitifs dédiés aux règles de conception	18
1.1.1 Manuels de règles de conception dans l'industrie manufacturière	18
1.1.2 Assistants cognitifs	20
1.1.3 Synthèse sur la nécessité d'assistants cognitifs dédiés aux règles de conception	22
1.2 Règles de conception.....	22
1.2.1 Définition et analyse théorique.....	22
1.2.2 Un ensemble hétérogène.....	23
1.2.3 Synthèse de l'état de l'art sur les règles de conception	25
1.3 Revue des représentations numériques des règles de conception et des assistants cognitifs associés	26
1.3.1 Représentation algorithmique	26
1.3.2 Représentation sémantique.....	29
1.3.3 Traitement du langage naturel	31
1.3.4 Des assistants cognitifs centrés sur la CAO	34

1.3.5	Synthèse de l'état de l'art sur les représentations numériques des règles de conception	35
1.4	Une approche centrée sur le concepteur	35
1.4.1	Informatique ubiquitaire	35
1.4.2	Sensibilité au contexte	36
1.4.3	Systèmes de recommandation.....	38
1.4.4	Synthèse de l'état de l'art sur une approche centrée sur le concepteur	41
1.5	Conclusion de l'état de l'art.....	42
1.5.1	Synthèse de l'état de l'art	42
1.5.2	Positionnement scientifique	43
1.5.3	Hypothèse de recherche	44
1.5.4	Méthode de résolution	45
Chapitre 2	Un assistant intelligent pour la conception.....	48
2.1	Description fonctionnelle	48
2.1.1	Présentation générale	48
2.1.2	Parties prenantes	50
2.1.3	Analyse des services de l'environnement de conception intelligent.....	51
2.2	Construction du modèle de données	54
2.2.1	Méthode de construction	54
2.2.2	Choix des sous-contextes	56
2.2.3	Présentation détaillée des sous-contextes	59
2.3	Synthèse.....	70
2.3.1	Description fonctionnelle de l'environnement de conception intelligent.....	70
2.3.2	Proposition d'un modèle de données orienté graphe	71
2.4	Conclusion du chapitre	73
Chapitre 3	Implémentation d'un démonstrateur	75
3.1	Structure logicielle du démonstrateur	75
3.2	Fonctionnalités du démonstrateur.....	77
3.2.1	Ecriture des sous-contextes sémantique et technique.....	77
3.2.2	Recommandation des règles de conception.....	80
3.2.3	Ecriture des sous-contextes social et numérique	85
3.3	Synthèse de l'implémentation.....	89

Chapitre 4 _ Validation expérimentale sur cas d'étude industriel	91
4.1 Présentation du cas d'étude général.....	91
4.1.1 Protocole expérimental.....	92
4.1.2 Activité de modélisation.....	93
4.1.3 Ensemble de règles de conception	94
4.1.4 Axes de mesure	94
4.2 Pré-expérimentations.....	98
4.2.1 Présentation	98
4.2.2 Panel de participants.....	98
4.2.3 Analyse des résultats.....	99
4.2.4 Limitations et synthèse	101
4.3 Expérimentations de faisabilité.....	102
4.3.1 Présentation	102
4.3.2 Panel de participants.....	104
4.3.3 Analyse des résultats.....	105
4.3.4 Limitations et synthèse	109
4.4 Synthèse des expérimentations	110
Conclusion et perspectives.....	112
A. Validation des apports	112
I. Validation de la structure	112
II. Validation de la performance	113
B. Conclusion	115
C. Limites	116
D. Discussion et perspectives	118
Production scientifique	120
Bibliographie	121
Table des Figures.....	131
Table des Tableaux.....	133

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier madame Claire LARTIGUE, Professeure des Universités au Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée, pour avoir présidé le jury de cette thèse. J'espère que nous aurons l'occasion de nous revoir pour continuer nos échanges.

Je remercie également les rapporteurs de ces travaux de thèse, messieurs Alexandre DURUPT, Maître de conférences HDR au laboratoire Roberval, et Samuel GOMES, Professeur des Universités au laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne. Merci pour votre lecture détaillée du mémoire et pour vos questions, qui ont permis une discussion scientifique passionnante lors de la soutenance.

Je remercie ensuite mon directeur de thèse, Frédéric SEGONDS, Maître de conférences HDR au Laboratoire de Conception de Produits et d'Innovation. Merci pour ton encadrement pendant ces trois ans au LCPI, pour la relecture de mes travaux et la préparation des présentations. J'espère que nous aurons l'occasion de retravailler ensemble à l'avenir.

Je remercie mon co-directeur, Philippe VERON, Professeur des Universités au Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Physiques Et Numériques. Merci pour ton encadrement scientifique, mais également ton soutien technique sur la plateforme 3DX.

Je remercie également mon co-encadrant, Romain PINQUIE, Maître de conférences au G-SCOP. Je te remercie pour avoir su m'encadrer malgré la distance qui nous séparait. Merci pour ta relecture attentive de mon travail et pour ton soutien technique sur le développement du démonstrateur. J'espère que nous aurons l'occasion de nous revoir.

Je remercie également l'entreprise Capgemini engineering, partenaire industriel de cette thèse dans le cadre de la chaire industrielle *PLM du futur*. Merci pour avoir apporté et soutenu ce projet de recherche. J'adresse un remerciement particulier à Benjamin DEGUILHEM, Victor FAU et Antoine MALLET qui ont suivi et encadré la thèse. Leur travail de mise en relation avec les collaborateurs de Capgemini engineering et de recherche des données pertinentes pour notre sujet a été essentiel pour la création du cas d'étude industriel de la thèse. Je me réjouis de vous rejoindre à Toulouse pour continuer la recherche côté industrie.

Je tiens à remercier le Laboratoire CPI, qui m'a accueilli pendant 3 ans. Je remercie Améziane AOUSSAT, Professeur des Universités et directeur de ce laboratoire. Merci monsieur pour vos retours sur mon travail lors des GTTs et pour votre soutien face aux diverses difficultés organisationnelles.

Je remercie les autres enseignants-chercheurs du laboratoire pour leurs retours et conseils. J'ai également une pensée pour le personnel du laboratoire. Merci pour votre bonne humeur et pour les nombreuses discussions lors des pauses déjeuner.

Je souhaite aussi remercier tous les doctorants avec qui j'ai eu la chance d'échanger durant cette thèse. Je remercie d'abord le groupe des doctorants du LCPI. Je vous suis très

reconnaissant pour les liens de solidarité et d'amitié que nous avons tissés ensemble. Vous m'avez été d'un grand soutien moral et scientifique, et j'espère avoir pu l'être pour vous. Cette dynamique positive entre les doctorants du LCPI est bénéfique à la qualité de la recherche et à l'ambiance du laboratoire.

J'adresse un remerciement particulier à mon homonyme et colocataire de bureau Armand LANG. C'était un vrai plaisir de travailler et d'accueillir les autres doctorants dans le *bureau des Armands*.

Je remercie également Lise KIM, ma collègue doctorante de la chaire *PLM du futur*. Nous avons mené nos thèses avec quelques mois d'écart. J'étais ravi de travailler avec toi et j'espère que nous aurons l'occasion de nous croiser plus souvent dans le sud.

Pour finir, je remercie ma famille et mes amis. Merci à mes parents, mon frère et ma sœur pour leur soutien indéfectible et leur affection. Merci Iris, pour m'avoir supporté en toutes circonstances pendant ces trois ans et pour ton aide dans la relecture du présent mémoire.

Armand HUET

Introduction

A. Présentation générale

Ce mémoire présente les travaux de thèse réalisés à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métier¹ (ENSAM) au sein des Laboratoires de Conception de Produits et d'Innovation² (LCPI) et de l'Ingénierie des Systèmes Physiques et Numériques³ (LISPEN). Motivée par les activités de conseil en ingénierie de l'entreprise Capgemini⁴, cette thèse s'inscrit dans le cadre de la chaire industrielle "PLM du futur", conclue entre Capgemini et l'ENSAM. Le co-encadrement de cette thèse fait intervenir le laboratoire des Sciences de la Conception et de la Production⁵ (G-SCOP) de Grenoble-INP.

Ces travaux visent à améliorer le processus de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) dans l'industrie manufacturière, en proposant un assistant intelligent dédié aux règles de conception. En effet, les règles de conception jouent un rôle essentiel dans le développement de produits industriels, qui doivent répondre à des exigences de qualité et d'efficacité toujours plus importantes. La bonne maîtrise des règles de conception dans le cadre de la CAO est donc un enjeu majeur pour les entreprises de l'industrie manufacturière. Cependant, la structuration, le maintien puis l'utilisation des règles de conception reste une activité complexe et génératrice d'inefficacités dans le processus de conception. C'est pourquoi nous proposons un assistant intelligent dédié aux règles de conception, capable d'accompagner en temps réel le travail des concepteurs industriels.

Dans cette introduction à nos travaux, nous présenterons le contexte de la thèse dont nous déduirons une question de recherche. Nous présenterons ensuite le positionnement de notre recherche ainsi que la structure du mémoire.

¹ <https://artsetmetiers.fr>

² <http://lcp.ensam.eu>

³ <http://lispen.ensam.eu>

⁴ <https://www.capgemini.com>

⁵ <https://g-scop.grenoble-inp.fr>

B. Contexte

I. Le processus de conception

Description théorique

La définition la plus large et reconnue du processus de conception est celle proposée par Ullman dans les années 90 [1] qui le définit par la succession des étapes nécessaires à l'obtention d'un produit répondant à des besoins identifiés. L'activité de concevoir est un comportement inné de l'espèce humaine qui a évolué au fur et à mesure des découvertes techniques et de l'apparition de nouveaux besoins. Les sciences de la conception, une branche du génie industriel, ont deux objectifs [2] :

- Comprendre l'activité de conception (e.g. comment les concepteurs collaborent ?)
- Améliorer l'activité de conception (e.g. proposer une nouvelle méthode ou outil de conception)

Les travaux de ce domaine ont abouti à de nombreuses méthodes de conception.

Dans le cadre de ces travaux, nous nous intéresserons plus particulièrement au concept d'ingénierie simultanée, ou "Concurrent engineering". Initiée dans les années 80, cette approche vise à optimiser le processus de conception grâce à l'anticipation des exigences et des contraintes qui s'appliqueront au produit tout au long de son cycle de vie. Les différentes branches et évolutions de cette approche sont détaillées par Stjepandic et *al.* dans leur livre "Concurrent engineering in the 21st century" [3]. Les méthodes de "Design for X" (DfX) forment l'une de ces branches. Elles ont pour objectif d'intégrer les connaissances d'un domaine spécifique au plus tôt dans le processus de conception. X peut donc être décliné en une propriété comme le coût ("Design to Cost") ou en une phase du cycle de vie comme l'assemblage ("Design for Assembly")[4]. L'intégration de ces connaissances est essentielle pour l'industrie. En effet, comme l'illustre la Figure 1, la majorité du coût total d'un projet est fixée lors des phases de conception alors que celles-ci ne représentent qu'une faible part de ce coût [5]–[7]. Dès la conception, il est donc essentiel de prendre des décisions qui minimisent les coûts et maximisent les performances pour toutes les phases du cycle de vie du produit. Les règles de conception jouent un rôle majeur dans cette prise en compte, en guidant les concepteurs vers de meilleures décisions.

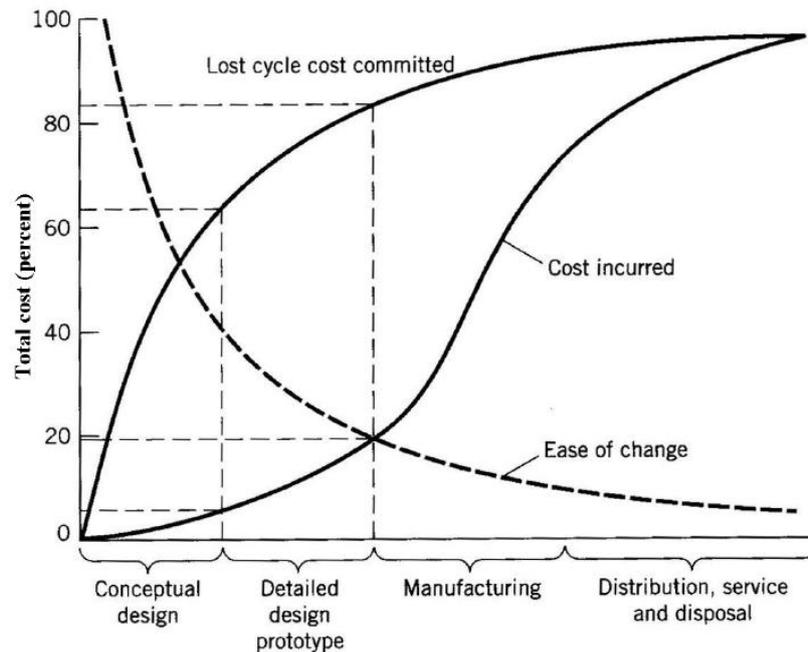


Figure 1: Evolution des coûts réels et des coûts engagés en fonction du cycle de vie du produit [7]

Une complexité croissante

En conception, la complexité peut avoir des sources très variées [8]. Elle peut être technique, liée à un procédé de conception difficile à maîtriser ou au nombre de pièces dans un assemblage. Elle peut aussi être organisationnelle, liée au nombre de collaborateurs sur un projet, à la transmission d'informations ou à la gestion de contrats de sous-traitance dans le cadre d'entreprises étendues. De nombreuses études font le constat d'une complexité de conception en croissance ininterrompue depuis les années 70 [9], [10]. On peut lister de façon non exhaustive plusieurs causes de cette augmentation :

- Une organisation plus complexe. Dans un contexte mondialisé, un projet de R&D est de plus en plus rarement mené par une entreprise seule, mais par un ensemble de partenaires aussi appelé entreprise étendue. De plus, le nombre de collaborateurs intervenant sur un projet est aussi en augmentation. Ces équipes peuvent appartenir à des branches différentes de l'entreprise étendue et être éloignées géographiquement, ce qui complexifie la coordination et l'échange d'informations [11].
- Une sophistication technique. Les domaines de connaissances intervenant dans le processus de conception sont plus nombreux et nécessitent l'intervention de plus de spécialistes. Dans les produits complexes comme les avions, on observe la présence d'un grand nombre de pièces avec une grande variété de procédés de fabrication et de matériaux. Il devient donc impossible pour le concepteur d'avoir une compréhension technique de l'ensemble des éléments de son produit.

- De nouvelles exigences. Les nouveaux produits développés par l'industrie manufacturière doivent répondre à un nombre croissant de nouvelles exigences. Par exemple, on observe une forte demande de personnalisation des produits. Cette personnalisation nécessite une gestion complexe des différentes configurations [12], [13]. Une meilleure anticipation du cycle de vie des produits est également exigée des constructeurs. Les nouveaux produits doivent être facilement transportables, ergonomiques, recyclables. Il en résulte de nouvelles méthodologies DfX qui complexifient le processus de conception [14].

Cette tendance observée sur les dernières années est amenée à s'accroître dans le futur. En effet, de nombreux enjeux émergents vont conduire à de nouvelles exigences et connaissances à intégrer au processus de conception. L'exemple le plus évident est celui de l'écoconception, avec de nouvelles réglementations mises en place par les pouvoirs publics comme l'union européenne [15]. Ces nouvelles exigences se traduisent par de nouvelles méthodes et recommandations de conception [16], [17], qui viennent complexifier le processus de conception.

II. Les règles de conception dans l'industrie manufacturière

Enjeux industriels

Les règles de conception ont pour objectif d'éviter les erreurs de conception. Par erreur de conception, on entend un mauvais choix de conception évitable avec les connaissances disponibles dans l'entreprise et entraînant des surcoûts, voire une non-conformité de tout ou partie du produit. Les industriels ont grand intérêt à limiter au maximum ces erreurs de conception et à corriger le plus rapidement possible celles qui sont commises. En effet, une erreur corrigée en phase de conception entraînera nettement moins de surcoûts qu'en phase de production ou en phase d'utilisation. On pense aux rappels massifs de produits auxquels doivent se résoudre certains industriels [18], [19]. Les fabricants communiquent peu sur les coûts de ces rappels. Un expert de l'industrie automobile évalue les coûts directs d'un rappel à 500 dollars par véhicule⁶. Selon l'ampleur du rappel, son coût direct se chiffre donc en millions de dollars pour les industriels de l'automobile. De plus, pour un fabricant, les coûts indirects d'un rappel sur son image, sur ses ventes et sur sa valeur boursière, dépassent probablement les coûts directs du rappel dans de nombreux cas [20], [21].

⁶ Article CNN du 25/02/2021 consulté en ligne le 03/01/2022, lien web : <https://edition.cnn.com/2021/02/25/tech/hyundai-ev-recall/index.html>

Une augmentation rapide de la quantité de règles de conception

L'augmentation des règles de conception répond à l'augmentation des contraintes et exigences qui s'appliquent aux produits. Diverses recherches techniques dans de nombreux domaines ont pour aboutissement la création de nouvelles règles de conception [22]–[25]. De même que la complexité du processus de conception, le nombre de règles ne cesse d'augmenter. La réponse des entreprises aux nouveaux défis de l'industrie sera accompagnée par la création de nombreuses nouvelles règles de conception [26].

Difficultés d'utilisation

La conception est une activité nécessitant d'importantes quantités d'informations et de connaissances. Les concepteurs ne peuvent avoir en mémoire toutes les informations nécessaires pour créer des modèles dépourvus d'erreurs. Ils alternent donc entre des phases de conception et des phases de recherche d'informations, dont des règles de conception. Les concepteurs doivent alors identifier, parmi toutes les règles utilisées par l'entreprise, les règles de conception applicables. Dans l'industrie, cette recherche est complexifiée par l'abondance de documents non structurés en langage naturel pour stocker les connaissances industrielles en général [27], y compris les règles de conception [28]. Dans le cadre de nos travaux, nous avons analysé sept manuels de règles de conception actuellement utilisés dans une grande entreprise de l'industrie aéronautique. Ces documents sont au format PDF et représentent un total d'environ 1800 pages, avec en moyenne 260 pages par document. Pour obtenir un ordre de grandeur du nombre de règles dans ce corpus, on fait l'hypothèse défavorable de deux règles de conception par page. On obtient donc un total de 3600 règles de conception dans le corpus global, et de 520 règles par document. Un tel corpus est complexe à maîtriser avec les capacités cognitives humaines et son utilisation nécessite des formations dédiées. Les concepteurs ne maîtrisent réellement cette ressource qu'après plusieurs années d'expérience. De plus, ces documents sont fastidieux à utiliser, surtout pour la recherche précise d'une règle. Une fois un modèle numérique fini, des étapes de validation sont toujours nécessaires pour s'assurer de l'absence d'erreurs. Dans l'industrie manufacturière, l'utilisation de logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) pour la conception de produits est très fréquente. La difficulté liée à la recherche des règles de conception vient alors s'ajouter à la difficulté d'utilisation de ces logiciels complexes. Le temps et l'énergie cognitive dédiés à la recherche et à la validation des règles de conception sont perdus pour la modélisation, le dimensionnement et la créativité.

Difficultés de gestion

En plus d'une utilisation complexe, les manuels de règles non structurés engendrent des difficultés de gestion de l'ensemble des règles des règles de conception. Il est en effet difficile d'analyser l'utilisation, l'impact et la pertinence des règles de ces manuels, car les informations non structurées ne donnent accès à aucune données de suivi. Il est impossible

de savoir avec quelle fréquence une règle de conception est utilisée et par qui. Ainsi, certaines règles présentes dans les manuels peuvent ne jamais être utilisées ou bien être obsolètes. Ces règles non pertinentes sont une source d'inefficacités et d'erreurs de conception. Seuls les retours des concepteurs permettent de les identifier afin de les corriger ou de les effacer des manuels. Il n'est de même pas possible de savoir sur quelles règles de conception s'est appuyé un concepteur pour modéliser une pièce. La validation des pièces est donc également rendue plus complexe par l'utilisation des manuels.

En raison de ces difficultés d'utilisation et de gestion, les manuels de conception non structurés nuisent à la maîtrise des règles de conception. Ils ne sont donc plus adaptés pour stocker les règles de conception.

C. Question de recherche

Dans la présentation du contexte, nous avons détaillé l'utilisation des règles de conception dans l'industrie manufacturière. Nous avons vu que l'accumulation de règles de conception dans des manuels non structurés est la source de nombreux problèmes auxquels les entreprises ne peuvent apporter de réponses efficaces. Les concepteurs industriels doivent donc dédier une partie de leur temps et de leurs capacités de concentration à la recherche, l'application et la validation des règles, au détriment de leur activité principale, la modélisation CAO. Le manque actuel de maîtrise des règles de conception dans l'industrie manufacturière a donc un impact négatif sur l'efficacité du processus de Conception Assistée par Ordinateur. Dans ce mémoire, nous répondrons donc à la question de recherche suivante :

QUESTION DE RECHERCHE

Comment améliorer l'efficacité du processus de Conception Assistée par Ordinateur par une meilleure maîtrise des règles de conception ?

D. Positionnement de la recherche

1.1.1 Communauté internationale

Nos travaux portent sur la maîtrise des règles de conception dans l'industrie manufacturière. Les équipes de chercheurs qui publient sur ce sujet à l'international sont

principalement situées en Chine, aux Etats-Unis et en Europe et travaillent dans les domaines de l'informatique pour l'industrie, de la CAO et de l'intelligence artificielle (Tableau 1).

Pays		Etablissements	Entités de recherche	Descriptions
Etats-Unis		School of Interactive Computing, Georgia tech	Department Computer Science and Human-Centered Computing	Informatique ubiquitaire pour l'industrie
		California State University Sacramento	Department of Mechanical Engineering	Ontologies des règles DfX
		Massachusetts Institute of Technology	Department of Mechanical Engineering	Intelligence artificielle pour la conception
Chine		Huazhong University of Science and Technology	School of Materials Science and Engineering	Analyse de la qualité des modèles CAO
		Northwestern Polytechnical University	Key Laboratory of Contemporary Designing and Integrated Manufacturing Technology	Analyse de la qualité des modèles CAO
		Xiangtan University	School of Materials Science and Engineering	Assistants cognitifs à la conception
Europe	Allemagne	Karlsruhe Institute of Technology	Institute for Automation and Applied informatics	Qualité de la CAO pour la fabrication additive
	Suisse	ETH Zurich	Engineering Design and Computing Laboratory	Application des règles en conception paramétrique
	Autriche	Austrian Center for Digital Production GmbH	Austrian Center for Digital Production GmbH	Assistants cognitifs à la conception
	Espagne	Universitat Jaume I	Department of Mechanical Engineering and Construction	Analyse de la qualité des modèles CAO
	Norvège	Oslo and Akershus University College of Applied Sciences	Department of Civil and Environmental Engineering	Analyse de la qualité des modèles BIM

Tableau 1 : Entités de recherche travaillant à la maîtrise des règles de conception à l'international

1.1.2 Communauté Française

En France, les laboratoires travaillant à la maîtrise des règles de conception sont spécialisés dans le génie industriel ou dans les sciences du numérique pour la conception (Tableau 2).

Ville	Etablissements	Entités de recherche	Descriptions
Paris	Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers	LCPI : Laboratoire de Conception de Produit et d'Innovation	Optimisation du processus de conception
Aix-en-Provence	Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers	LISPEN : Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Physiques Et Numériques	systèmes dynamiques multiphysiques et virtuels pour l'Industrie du Futur
Grenoble	Grenoble INP	G-SCOP : Laboratoire des Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production	Conception de produit ; ingénierie des connaissances
Strasbourg	Université de Strasbourg	ICube : Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie	Technologies de l'information et de la communication
Compiègne	Université de Technologie de Compiègne	Laboratoire Roberval	Conception de structures et systèmes complexes
Paris	Université Paris-Saclay	Laboratoire Génie Industriel	Ingénierie de la Conception
Nantes	Centrale Nantes	Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique	Intégration des contraintes matériaux, procédés, systèmes, dans le processus de conception
Belfort	UTBM	ICB - COMM	Conception avancée de systèmes mécaniques

Tableau 2 : Entités de recherche travaillant à la maîtrise des règles de conception en France

Parmi ces acteurs nos travaux sont notamment menés en collaboration avec le laboratoire G-SCOP :

Le G-SCOP est un laboratoire travaillant sur l'optimisation des systèmes de production. Il développe des compétences pluridisciplinaires pour répondre aux défis scientifiques de l'industrie. Nos travaux s'inscrivent dans deux champs de recherche majeurs pour le laboratoire, la conception de produit et l'ingénierie des connaissances.

1.1.3 Cadre de la thèse

Ces travaux de thèse ont été réalisés au LCPI et au LISPEN, dans le cadre de la chaire industrielle "PLM du futur" signée entre les Arts et Métiers et la société de conseil en ingénierie Caggemini :

LCPI

Les travaux du LCPI ont pour objectif l'optimisation des processus de conception et d'innovation et s'inscrivent dans le domaine du génie industriel. La recherche du laboratoire se décompose en deux axes :

- L'axe métiers vise à enrichir le processus de conception par l'intégration de nouvelles connaissances, règles et outils métiers (design, ergonomie, ingénierie...).
- L'axe processus ambitionne la formalisation globale du processus de conception pour mieux le comprendre et l'optimiser.

Ces travaux de thèse visent à apporter une solution à l'accumulation des règles métiers en proposant une nouvelle approche pour une meilleure maîtrise de celles-ci. Ils s'inscrivent donc dans l'axe processus du laboratoire et s'appuient sur l'expertise du laboratoire dans la gestion des connaissances et du cycle de vie des produits (Figure 2).

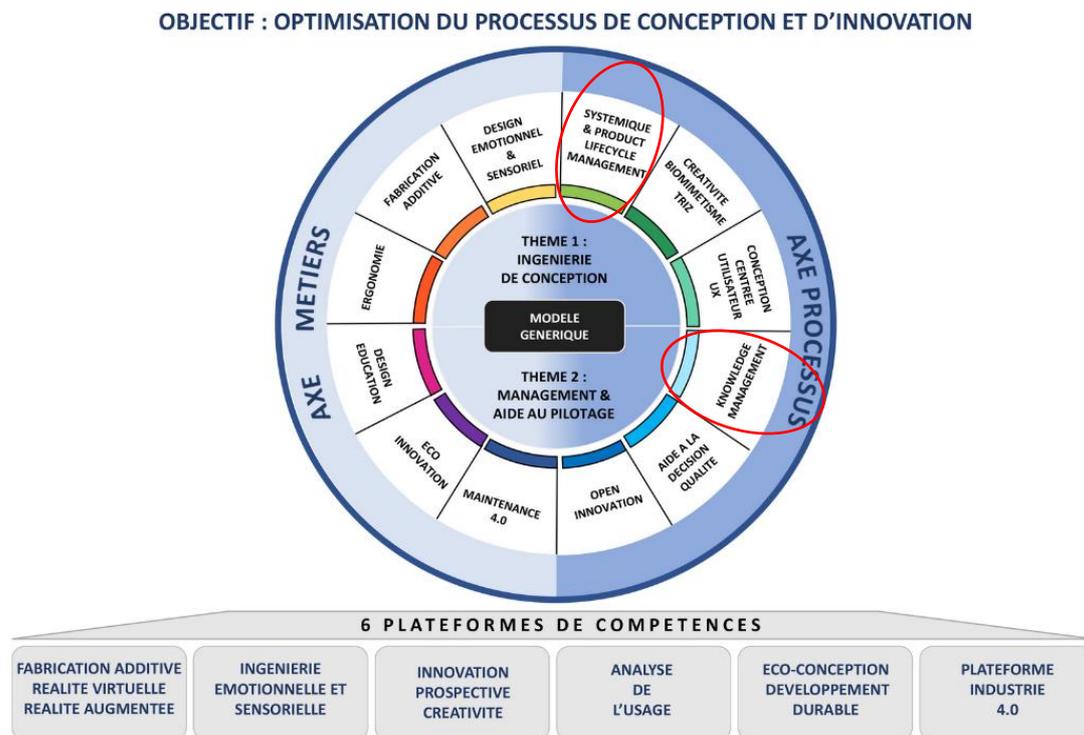


Figure 2 : Cadrant de la recherche au LCPI

LISPEN

La recherche du LISPEN s'articule autour des systèmes dynamiques multiphysiques et virtuels pour l'Industrie du Futur. Le laboratoire intègre les quatre problématiques principales suivantes : l'ingénierie système et les maquettes numériques, la simulation et le contrôle des systèmes, l'interaction Homme-Système et l'aide à la décision.

Capgemini

La société Capgemini est spécialisée dans le conseil, le service informatique et la transformation numérique dans de multiples secteurs comme l'industrie, le service financier ou encore la télécommunication. Créée en 1967 sous le nom de Sogeti, elle fait depuis partie des acteurs mondiaux du secteur et se place comme première Entreprise de Service en Numérique de France en 2020⁷. Capgemini est engagée dans la recherche de nouvelles technologies pour ses clients avec son propre institut "Capgemini Research Institute" mais également avec des partenariats comme celui de la chaire "PLM du futur" avec les Arts et Métiers.

Chaire industrielle "PLM du futur"

Signée le 4 Mars 2020 entre l'entité *Digital Engineering and Manufacturing Services* de Capgemini et l'ENSAM, cette chaire industrielle ambitionne de répondre aux enjeux de la numérisation de l'industrie en proposant de nouvelles approches de valorisation des données tout au long du cycle de vie des produits. En effet, la masse de données générée par l'industrie manufacturière, évaluée à 3.5 exabyte (10^{18} octets) en 2018 [29], amène de nouvelles problématiques et opportunités. La chaire recouvre les trois axes nécessaires à la valorisation des données : l'accès aux données, la structuration des données et enfin le développement de services liés aux données.

Une thèse de doctorat, défendue par Lise Kim et intitulée "Proposition d'un système de recherche d'information dans un environnement numérique distribué et hétérogène : application à l'industrie manufacturière" [30], a déjà été menée dans le cadre de la chaire. Ces travaux visent à construire un système de recherche d'information adapté aux besoins de l'industrie manufacturière. Pour cela, ils prennent en compte l'ensemble des données hétérogènes produites par l'industrie et proposent une structure des données adaptée pour une recherche d'information optimisée.

Les travaux de thèse présentés dans ce mémoire se concentrent sur le processus de Conception Assistée par Ordinateur et sur la maîtrise des règles de conception au sein de ce processus. Les données considérées sont les documentations de règles utilisées dans l'industrie manufacturière. Nos travaux proposent une structure de données permettant une nouvelle approche, centrée sur le concepteur, dans l'utilisation des règles de conception.

Ces deux thèses s'inscrivent donc dans le même objectif global et apportent, à différentes échelles, des solutions pour l'exploitation des ensembles de données hétérogènes et non structurés.

⁷ https://syntec-numerique.fr/sites/default/files/Documents/Classement_des_ESN_ICT_2020_vdef_0.pdf

E. Structure du mémoire

Ce manuscrit de thèse est structuré en quatre chapitres.

L'**introduction** établit le contexte de notre étude. Nous y faisons le constat des enjeux et des difficultés liés à l'utilisation de règles de conception stockées dans des manuels non structurés. Nous en déduisons la question de recherche suivante : **comment améliorer l'efficacité du processus de Conception Assistée par Ordinateur par une meilleure maîtrise des règles de conception ?**

Afin d'établir une hypothèse de recherche, le **Chapitre 1** présente un état de l'art des règles de conception et des outils destinés à améliorer leur exploitation.

L'analyse de l'état de l'art démontre la nécessité d'un assistant intelligent utilisant une approche centrée sur le concepteur. Cette approche repose sur la recommandation contextuelle de règles de conception en langage naturel. Afin de vérifier la validité de cette approche, nous posons l'hypothèse de recherche suivante : **des recommandations contextuelles de règles de conception permettent d'améliorer le processus de Conception Assistée par Ordinateur.**

Le **Chapitre 2** est consacré à la description théorique de l'assistant intelligent. La première partie de ce chapitre présente une analyse fonctionnelle de l'assistant, tandis que la deuxième partie est dédiée à la construction d'un modèle de données orienté graphe adapté à ces fonctionnalités.

Le **Chapitre 3** détaille le développement d'un démonstrateur de l'environnement de conception intelligent nécessaire à la validation expérimentale de l'hypothèse de recherche. L'architecture logicielle du démonstrateur ainsi que l'implémentation des fonctions techniques nécessaires à la réalisation des services rendus par l'environnement de conception intelligent y sont présentés.

Le **Chapitre 4** présente les expérimentations comparant une démarche outillée avec démonstrateur de l'environnement de conception intelligent à une démarche traditionnelle basée sur un corpus de manuels de conception non structurés. Ces expérimentations s'appuient sur un cas d'étude industriel dans l'aéronautique.

La **conclusion** de ce mémoire présente les limites de nos travaux ainsi qu'une discussion sur les perspectives à court, moyen et long terme.

Chapitre 1 _ Etat de l'art

Dans cet état de l'art, nous analyserons les connaissances scientifiques disponibles en lien avec notre question de recherche : **comment améliorer l'efficacité du processus de Conception Assistée par Ordinateur par une meilleure maîtrise des règles de conception ?** Une réponse hypothétique à cette question sera formulée à partir de l'état de l'art qui s'articule selon quatre parties :

- La partie 1.1 revient sur les problématiques liées aux règles de conception rencontrées par les concepteurs. Nous verrons que le développement d'assistants cognitifs dédiés aux règles de conception est nécessaire afin d'améliorer l'efficacité du processus de CAO.
- La représentation numérique des règles de conception est une étape essentielle au développement d'assistants cognitifs. Dans la partie 1.2, nous nous pencherons sur la description théorique des règles de conception et proposerons une taxonomie de l'ensemble des règles.
- Dans la partie 1.3, nous analyserons les différentes représentations numériques des règles de conception proposées par la communauté scientifique. Chaque représentation est associée à un type d'assistant cognitif. Nous verrons que la majorité des outils existants reposent sur une approche centrée sur la CAO et que cette approche ne permet pas une utilisation fluide des règles dans le processus de conception.
- Le constat de la partie précédente nous amènera à étudier la possibilité d'une nouvelle approche centrée sur le concepteur. Dans la partie 1.4, nous étudierons donc les différentes briques technologiques nécessaires au développement de cette approche.

1.1 Nécessité d'assistants cognitifs dédiés aux règles de conception

1.1.1 Manuels de règles de conception dans l'industrie manufacturière

Les connaissances expertes de domaines variés sont essentielles au processus de conception. Les règles de conception permettent d'intégrer ces savoirs à la conception de produits en créant une interface simplifiée de ce corpus de connaissances pour le concepteur [31]. Pour répondre à une complexité de la conception en augmentation, les entreprises sont amenées à imposer un nombre croissant de règles de conception. Les documentations non structurées sont faciles à mettre en place et donc très largement utilisées dans l'industrie manufacturière.

Afin de compléter le constat établi dans le contexte de nos travaux, nous avons étudié l'utilisation des manuels de règles de conception dans l'industrie. Cette étude se base sur un

questionnaire diffusé en ligne à un ensemble de concepteurs professionnels du groupe Capgemini Engineering. 37 concepteurs des secteurs de l'aéronautique, de l'aérospatial, de l'énergie et de l'outillage industriel ont répondu à ce questionnaire. 77.1% des répondants affirment avoir au moins un usage occasionnel des règles de conception à partir de documents non structurés. Pour plus de 45% des répondants, cet usage est fréquent ou très fréquent. Cependant, les concepteurs rencontrent plusieurs difficultés dans l'utilisation de ces règles :

- Les règles de conception stockées dans des documents non structurés sont difficiles à retrouver pour le concepteur. Il ou elle doit y accorder du temps et de la concentration qui n'est pas disponible pour d'autres tâches. En effet, 58.8% des répondants au questionnaire déclarent trouver le temps de recherche de règles trop long. La situation peut être complexifiée par la façon dont la documentation est organisée. Trois répondants font état de documents nombreux et éparpillés entre différentes équipes ou différents projets. Ce temps de recherche n'apporte en lui-même aucune valeur ajoutée au processus de conception.
- La mise à jour des documents non structurés est également complexe. 29.4% de nos répondants déclarent avoir été confronté à des règles de conception obsolètes. La mise à jour de ces documents est longue et fastidieuse. Le suivi des règles est également problématique. Il est laborieux de savoir quelles règles ont été utilisées par un concepteur et encore plus difficile de confirmer la bonne application de ces règles. Un meilleur suivi de l'utilisation des règles permettrait de faciliter la validation des pièces. Il pourrait également permettre d'identifier les règles peu utilisées et donc potentiellement inutiles ou obsolètes.
- Les répondants insistent notamment sur la formation nécessaire à l'utilisation de cette documentation. Un participant déconseille de consulter la documentation de règles en autodidacte. Plusieurs répondants expérimentés indiquent aussi que les formations s'oublient avec le temps. L'aide d'un collègue pour la recherche et/ou la compréhension de certaines règles est souvent nécessaire. 69.7% des répondants déclarent avoir un besoin au moins occasionnel du soutien d'un collègue sur ces questions.

Au final, les règles de conception permettent d'améliorer la qualité des pièces conçues et de transmettre le savoir faire de l'entreprise. 57.4% des répondants déclarent être satisfaits ou très satisfaits par l'utilisation des règles de conception. Aucun répondant estime ne pas être satisfait. L'habitude d'utilisation et les formations permettent à la majorité des répondants de bien maîtriser l'ensemble des règles de conception en vigueur dans leur domaine. 51.5% d'entre eux déclarent avoir une maîtrise correcte des règles de conception, 15.2% d'entre eux en ont une maîtrise experte.

Les règles de conception sont des représentations codifiées des connaissances des entreprises à la destination des concepteurs. Cependant, les manuels de règles en langage naturel induisent des inefficacités dans le processus de conception et ne permettent pas le suivi de leur utilisation par les concepteurs. Il semble donc naturel de s'appuyer sur la base de connaissances que constitue ces règles pour développer des assistants cognitifs destinés à

améliorer l'efficacité du processus de conception en automatisant ou en simplifiant les interactions des concepteurs avec les règles en vigueur dans leurs entreprises.

1.1.2 Assistants cognitifs

Définitions

Tecuci et *al.* [32] définissent un assistant cognitif comme un logiciel capable d'apprendre des connaissances expertes nécessaires à la résolution de problèmes et d'utiliser ces connaissances pour aider ses utilisateurs à résoudre des problèmes similaires. Cette définition est sémantiquement proche de celle d'un système expert, lequel est défini comme un logiciel développé pour modéliser les capacités de résolution de problèmes d'experts [33]. Les assistants cognitifs sont principalement utilisés dans des domaines qui sont cognitivement exigeants, c'est à dire qui demandent le traitement rapide de grandes quantités d'informations comme dans le pilotage aérien [34], [35], ou qui demandent beaucoup d'expérience et d'entraînement comme dans le diagnostic médical [36], [37].

Les systèmes experts ont été introduit dans les années 70. Ces systèmes experts reposent majoritairement sur de faibles quantités de connaissances, formalisées par un ensemble de règles logiques et formelles. Plusieurs livres et articles des années 80 et 90 apportent une rétrospective sur les techniques et les applications de cette première génération d'assistants cognitifs [38]–[41]. Les avancées techniques en informatique dans le domaine des logiciels intelligents ont permis le développement d'assistants cognitifs. Ces programmes sont appelés intelligents en raison de leur capacité à effectuer des raisonnements jusque-là réservés aux humains. Cependant, ces raisonnements reposent sur l'interprétation de grandes quantités de données d'origine humaine. Dans une récente revue de ce domaine scientifique, Perkusich et *al.* [42] définissent les logiciels intelligents par l'utilisation de techniques d'exploration des données. Ainsi donc, on peut parler de sciences des données pour désigner ces technologies [43], [44]. Le raisonnement à partir de données issues d'experts permet donc de réutiliser ces connaissances dans le cadre d'assistants cognitifs.

Les définitions associées aux concepts de données, informations et connaissances reposent sur une hiérarchie des connaissances proposée par Ackoff en 1989 [45] et largement discuté dans la communauté scientifique depuis [46]–[48]. Les données sont des éléments d'information non interprétées, elles n'apportent pas de compréhension si prises individuellement. Une information est un regroupement de données pertinentes donnant un élément de compréhension. Une connaissance représenter un regroupement d'informations reliées entre elles et permettant la prise de décision. Un assistant cognitif raisonne sur des connaissances, c'est-à-dire un réseau d'informations structurées.

Il existe de nombreuses approches pour développer des assistants cognitifs basés sur les sciences des données. Le "raisonnement par cas" [49]–[51] est un exemple d'approche

fréquente. Pour une approche basée sur l'intelligence artificielle, on parlera d'humain augmenté par l'intelligence artificielle [52]. Ces techniques ont permis la démocratisation des assistants cognitifs, avec le développement d'assistants généralistes à destination du grand public comme les assistants de Google⁸, Apple⁹, Amazon¹⁰ ou Microsoft¹¹.

Limitations

Plusieurs problématiques et limitations sont associées aux assistants cognitifs en général. Elles sont à prendre en compte et à anticiper lors du développement d'assistants cognitifs afin de minimiser leur impact. On relève deux problématiques principales :

- Les assistants cognitifs peuvent avoir un effet de boîte noire, c'est-à-dire qu'il devient impossible pour un humain utilisant cet outil de comprendre son raisonnement et les justifications de ses choix ou recommandations. Ces assistants sont alors difficiles à évaluer, corriger ou adapter. Des potentiels biais peuvent ne pas être détectés ou bien être trop complexes à corriger a posteriori. Ces problématiques sont connues depuis longtemps des experts des sciences des données. De nombreux travaux tentent de rendre certaines méthodes explicables [53]–[55] ou de développer de nouvelles méthodes qui le sont [42], [56]–[58]. L'effet boîte noire est particulièrement problématique dans le développement d'assistants cognitifs pour l'industrie car il peut mener à une perte de créativité et de connaissances de la part des collaborateurs. Dans le cas d'activités risquées comme la conduite automobile ou le pilotage aérien, une perte de contrôle des utilisateurs peut amener à des risques non maîtrisés [59]. Les problématiques d'inexplicabilité de certaines techniques d'intelligence artificielle complexifient le déploiement d'assistants cognitifs et de systèmes autonomes dans ces domaines [60], [61].

- Le bon fonctionnement d'un assistant cognitif dépend de la qualité et de la structure de ses données d'entrée, nécessaires à son raisonnement. Cowan [62] identifie ainsi deux problématiques liées aux données d'entrée. La première est l'accès à des connaissances de qualité et en quantité suffisante. En effet, des biais non identifiés dans le corpus de données se répercuteront dans le raisonnement de l'assistant cognitif. De plus, de trop faibles volumes de données ne permettront pas au logiciel de fonctionner efficacement. La deuxième problématique porte sur la modélisation des données. En effet, certaines données non formelles et abstraites sont bien plus difficiles à modéliser. La modélisation des connaissances d'expert en conception est d'ailleurs l'objet de nombreux travaux [63], [64].

⁸ https://assistant.google.com/intl/fr_fr/

⁹ <https://www.apple.com/fr/siri/>

¹⁰ <https://developer.amazon.com/fr-FR/alexa>

¹¹ <https://www.microsoft.com/en-us/cortana>

1.1.3 Synthèse sur la nécessité d'assistants cognitifs dédiés aux règles de conception

Dans cette partie, nous avons vu que l'utilisation de manuels de conception engendre de nombreuses inefficacités dans le processus de conception. En effet, des formations spécifiques sont nécessaires aux concepteurs pour acquérir une bonne maîtrise de cette documentation. De plus l'utilisation de documents non structurés complexifie la nécessaire mise à jour des règles et ne permet pas le suivi de leur utilisation.

Afin d'améliorer l'efficacité du processus de conception assisté par ordinateur et de permettre une meilleure maîtrise des règles, Le développement d'assistants cognitifs dédiés à ces règles est une nécessité. Après une étude théorique du concept d'assistant cognitif, nous avons identifié deux problématiques à prendre en compte lors de leur développement : le risque d'un effet boîte noire et la nécessité d'un accès à des informations structurées.

Dans le cas d'un assistant cognitif dédié aux règles de conception, un effet boîte noire qui entrainerait une perte de compétences chez les concepteurs est à éviter au maximum. Le développement d'un tel assistant cognitif nécessite l'accès à des représentations numériques structurées des règles de conception. Or, comme on l'a vu, celles-ci se retrouvent principalement dans des manuels en langage naturel. Afin d'étudier les différentes représentations possibles, il est nécessaire de définir précisément les règles de conception et d'établir une taxonomie permettant d'identifier leurs différentes caractéristiques.

1.2 Règles de conception

1.2.1 Définition et analyse théorique

Le concept de règle de conception est large et difficile à définir. La définition la plus exhaustive est celle du principe de conception, décrit selon quatre critères [65] :

- C'est un énoncé formulé à l'impératif
- Il prescrit au concepteur une action à effectuer
- Il augmente les chances d'obtenir un résultat positif
- Il est lié à un contexte et un temps spécifique

On note dès cette définition générale qu'une règle de conception est forcément reliée à un contexte de conception et à une temporalité. En effet, une règle n'est pas vraie dans l'absolue et ne s'applique pas à toutes les situations. Un concepteur doit donc considérer les règles qui sont applicables à son contexte de conception. De plus, ce contexte, ou la règle elle-même, sont amenés à être révisés dans le temps.

Calkins et *al.* [66] proposent une définition plus technique et étroitement liée au domaine de l'ingénierie des connaissances ("Knowledge Based Engineering" – KBE). Les règles de conception synthétisent les connaissances d'une entreprise et indiquent au concepteur comment elle doit être utilisée pour créer un modèle robuste. Par robuste, on entend un modèle répondant aux critères de qualité de l'entreprise.

Nadeau et *al.* [31] proposent une définition proche mais centrée sur le concepteur et ses interactions. Ils considèrent que les règles de conception sont un moyen de simplifier l'interaction qu'a le concepteur avec les connaissances des experts. Rendre cette interaction plus efficace permet d'améliorer les performances globales du concepteur.

Dans le cadre de cette thèse, nous apportons une attention particulière aux manuels de règles utilisés dans l'industrie manufacturière. Dans ces manuels, les règles de conception sont caractérisées par un énoncé à l'impératif pouvant être accompagné d'éléments descriptifs tels que des schémas, des tableaux ou des formules de dimensionnement.

A titre d'exemple, considérons la règle suivante : *"The stiffener run-out web slope: In tension, the web slope angle must be as small as possible (fatigue case) whereas in compression, he must be as high as possible to increase the inertia (static case). A run-out web slope angle of 20° is a good compromise."*. Cette règle sera accompagnée dans un manuel de conception par la Figure 3.

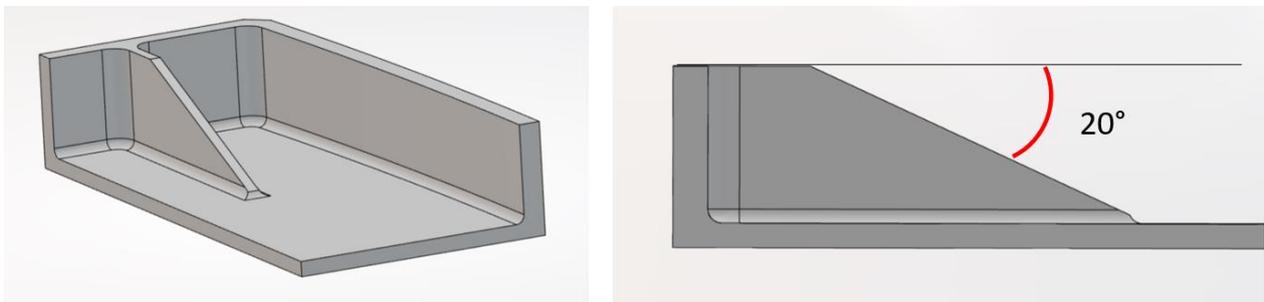


Figure 3 : Exemple de schéma accompagnant une règle de conception dans un manuel

1.2.2 Un ensemble hétérogène

L'ensemble des auteurs s'accordent sur le caractère hétérogène des règles de conception. Cette hétérogénéité s'exprime par les diverses origines des règles, les niveaux de contrainte ainsi que les différents degrés de formalisme.

Origines des règles de conception

Calkins et *al.* [66] considèrent 4 types d'origines pour les règles de conception :

Heuristiques : Ces règles font partie des bonnes pratiques ou des habitudes de conception des entreprises. Elles ne sont pas justifiées par des exigences techniques. En revanche, elles peuvent être imposées pour des raisons organisationnelles. Par exemple, une entreprise peut imposer certaines méthodes de modélisation pour faciliter la vérification des pièces, leur réutilisation ou modification.

Empiriques : Les règles empiriques sont basées sur des données expérimentales comme des études d'usure des matériaux.

Contraintes légales : Les règles de conception issues de contraintes légales sont prescrites par les différentes normes en vigueur. Ces normes peuvent imposer directement des règles de conception. Elles peuvent aussi être indirectement à l'origine de certaines règles. Par exemple, la taille des conteneurs, imposée légalement, contraint la conception des produits destinés à l'export. Les entreprises concernées créent alors des règles de conception afin d'optimiser le transport de leurs produits [67].

Physiques : Les règles de conception issues de contraintes physiques s'assurent que le produit conçu pourra être fabriqué et ne cassera pas lors de son utilisation. Les règles issues de calculs de dimensionnement rentrent dans cette catégorie.

Ces catégories sont assez restrictives et ont été pensées pour le domaine du KBE. Dans le domaine de la CAO, il est possible de trouver des règles ne correspondant pas à ces critères. Par exemple, les règles de conception de type DfX ont généralement pour origine des avis d'experts du domaine X. On peut néanmoins retenir que les règles de conception peuvent avoir des origines très variées.

Niveaux d'impératif des règles de conception

A ces différentes origines viennent s'ajouter plusieurs niveaux d'impératif. Une règle de conception peut être un conseil au concepteur qu'il n'est pas essentiel de suivre, ou bien être une contrainte non négociable. La différence entre ces niveaux d'impératif n'est pas toujours explicitée dans les manuels de conception mais bien présente en pratique. Mourtzis et al. proposent une classification des règles de conception selon leur niveau d'impératif [68].

Règles formelles et informelles

Le rôle important des connaissances et échanges informels dans le processus de conception est connu depuis longtemps [69], [70]. Les documentations de règles de conception ne font pas exception [71]. On peut donc séparer les règles de conception en deux catégories, les règles formelles et les règles informelles.

Les règles formelles fournissent un contexte d'application clair et des consignes non soumises à l'interprétation. Même si certaines ambiguïtés peuvent être introduites par l'utilisation du langage naturel, leur application ne fait pas ou peu appel à l'interprétation ou au choix de l'utilisateur. Ainsi, une règle formelle en langage naturel pourra facilement être

représentée numériquement par ensemble de relations logiques causes conséquences, associées à des formules mathématiques précises. Une règle formelle aura par exemple la formulation suivante : *“Pour une pièce en aluminium conçue pour un usinage traditionnel, l'épaisseur minimum des murs de renfort est de 2 mm”*. Ces règles sont généralement associées à un haut degré d'impératif.

Les règles informelles prennent la forme de conseils au concepteur, de stratégies de conception à privilégier, de procédures à respecter etc. En général, ces règles ne peuvent pas être vérifiées par simple étude du modèle CAO et leur représentation numérique peut être complexe. Un exemple de règle informelle : *“Tout choix d'outils de fraisage non standards devra être validé en amont par le bureau des méthodes”*.

Les règles de conception forment donc un ensemble fortement hétérogène ce qui complexifie leur maîtrise.

1.2.3 Synthèse de l'état de l'art sur les règles de conception

Dans cette partie, nous avons étudié les connaissances scientifiques disponibles portant sur les règles de conception.

Nous avons tout d'abord défini le concept de règle de conception à partir des travaux de Fu et al. [65] qui définissent une règle de conception comme un énoncé à l'impératif prescrivant au concepteur une action augmentant les chances d'obtenir un résultat positif. Ils insistent également sur le fait qu'une règle n'est valable que dans un contexte spécifique. Dans l'industrie, ces règles sont stockées dans des documents non-structurés en langage naturel dans lesquels les énoncés sont souvent associés à des formules, schémas ou images.

L'ensemble des règles de conception est fortement hétérogène. Les règles de conception ont des origines diverses, des niveaux d'impératif différents et peuvent être plus ou moins formelles (Figure 4). Cette hétérogénéité complexifie la représentation numérique des règles de conception. En effet, un choix de représentation peut facilement n'être pertinent que pour une partie de l'ensemble des règles disponibles dans les manuels de conception. Dans la partie précédente de l'état de l'art, nous avons vu que ces choix de représentation jouent un rôle primordial dans le développement d'assistants cognitifs.

Dans la prochaine partie de l'état de l'art, nous étudierons les différentes représentations numériques des règles de conception proposées dans la littérature. Lors de l'analyse de ces représentations, une attention particulière sera donc portée à leur capacité à modéliser l'ensemble des règles issues des manuels de conception.

Ensemble des règles de conception		
Niveau de formalisation	Niveau d'impératif	Origine des règles
<p><u>Règle formelle</u></p> <p>Non soumise à interprétation Traduisible en prédicat logiques Causes non ambiguës Conséquences soumises à des règles mathématiques</p>	<p><u>Règle fortement impérative</u></p> <p>A respecter dans tous les contextes de conception où la règle est applicable. Aucune concertation préalable n'est nécessaire à l'application</p>	<p><u>Règle heuristique</u></p> <p>Issue des bonnes pratiques et des habitudes de l'entreprise</p>
<p><u>Règles non formelles</u></p> <p>Recommandation au concepteur Difficilement vérifiable sur le modèle CAO Soumise à l'interprétation du concepteur ou d'un autre acteur du processus de conception</p>	<p><u>Règle faiblement impérative</u></p> <p>A respecter dans un contexte de conception soumis à l'interprétation. Une concertation préalable avec différents acteurs du processus de conception peut être nécessaire</p>	<p><u>Contrainte légale</u></p> <p>Issue directement ou indirectement d'une norme ou d'une loi</p>
		<p><u>Règle DfX</u></p> <p>Issue des recommandations d'experts d'un domaine X</p>
		<p><u>Autres origines</u></p> <p>De nombreux facteurs influent sur le processus de conception et peuvent mener à des règles</p>

Figure 4 : Taxonomie de l'ensemble des règles de conception

1.3 Revue des représentations numériques des règles de conception et des assistants cognitifs associés

Cette partie est un état de l'art des différentes approches de modélisation des règles de conception et des assistants cognitifs découlant de ces méthodes.

1.3.1 Représentation algorithmique

Définitions

Les règles de conception sont représentées numériquement par des algorithmes. Ces algorithmes visent à l'application automatique de règles dans des modèles paramétriques (Figure 5) ou à la détection d'erreurs de conception dans la maquette numérique (Figure 6). Dans le premier cas, le respect des règles modélisées est garanti dans le modèle paramétrique. Dans le second cas, les erreurs de conception détectées par les algorithmes sont signalées aux concepteurs afin qu'elles soient corrigées.

```

(@RULE= RuleColumn_Length_Change
(@LHS=
(<> (column_length) (spindle_lmguide_length.Value))
)
(@HYPO= Def_Column_Length)
(@RHS=
(Assign (column_length-1672+1510) (spindle_lmguide_length))
(Assign (column_length) (step_length_for_spindle_lmguide))
)
)
)
(@RULE= RuleColumn_Width_Change
(@LHS=
(<> (column_width) (spindle_box_width-100))
)
(@HYPO= Def_Column_Width)
(@RHS=
(Assign (column_width-100) (spindle_box_plate_width))
(Assign ((column_width-100)/2+40) (spindle_box_width))
)
)
)

```

Figure 5 : Règles appliquées à un modèle paramétrique [72]

Rule 1. If the relative area s_{pi} of the non-fillet f_i is smaller than a certain threshold δ , then f_i is a tiny non-fillet face, that is

$$s_{pi} = \frac{s_i}{\sum_{f_k \in S_A} s_k + s_i} < \delta \quad (1)$$

where s_k is the area of f_k , S_A is the adjacent faces of f_i .

Rule 2. If the common edge between a non-fillet face f_i and its adjacent face f_p is a concave edge $e_{concave}$, then f_i is a concave edge face, that is

$$\begin{cases} f_i \cap f_p = e_{concave} \\ f_p \in \{f_1, f_2, \dots, f_n\} \end{cases} \quad (2)$$

where $\{f_1, f_2, f_3, \dots, f_n\}$ is the adjacent face set of f_i .

Figure 6 : Détection d'erreurs de conception [73]

Langages et outils de modélisation

La représentation algorithmique des règles de conception découle de l'approche du "Knowledge Based Engineering" ou KBE, qui peut se traduire par la conception basée sur les connaissances. Cette approche se développe dans les années 90 grâce à la généralisation de l'informatique dans le processus de conception et notamment l'utilisation généralisée des outils de CAO. Les logiciels de KBE sont utilisés pour automatiser des phases répétitives ou complexes dans le processus de conception et ont permis des gains d'efficacité importants. Plusieurs travaux reviennent sur les technologies KBE, leurs impacts sur le processus de conception ainsi que leurs récents développements [74], [75].

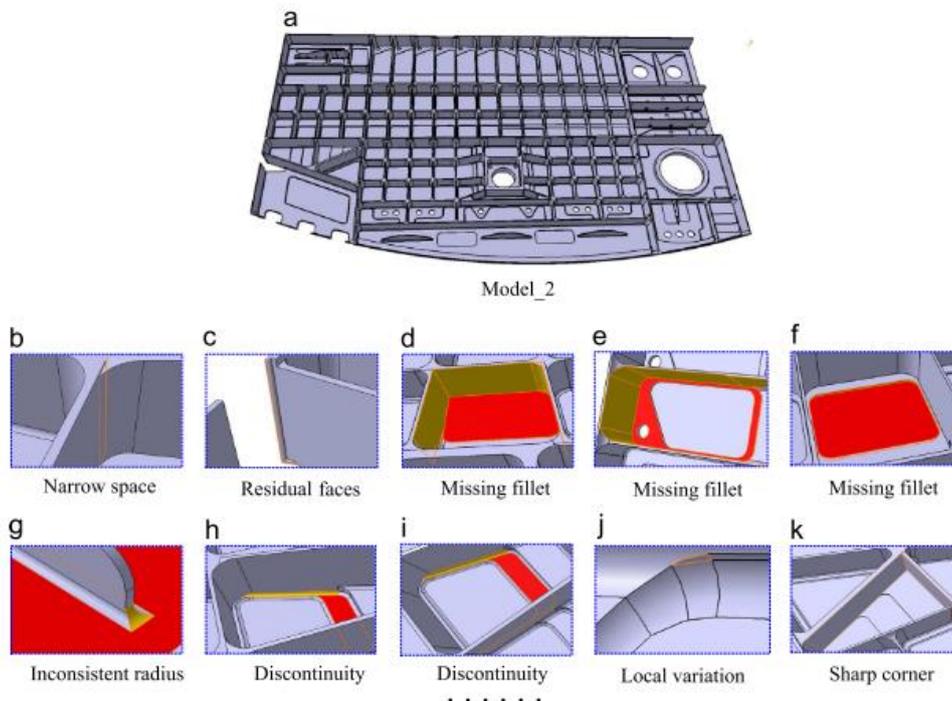


Figure 7 : Erreurs de conception détectées dans une maquette numérique [73]

Exemples de la littérature

Dans le domaine de la conception paramétrique, Myung et Han [72] proposent un système d'assemblage paramétrique qui respecte un ensemble de règles heuristiques. En modifiant les paramètres du modèle, le concepteur peut modifier l'assemblage en réduisant le risque d'erreurs de conception.

La seconde représentation algorithmique des règles de conception est utilisée par la majorité des logiciels commerciaux capables de vérifier qualité de la CAO [76], [77]. Les travaux de Bo Huang et *al.* [73] et Elkaseer et *al.* [78] sont des exemples de recherches récentes destinées à améliorer ces algorithmes de recherche d'erreurs (Figure 7). Cette représentation ne s'applique qu'à des règles mathématiques centrées sur la géométrie et la topologie dont le non-respect est directement identifiable sur le modèle numérique des pièces.

Limitations

De façon générale, la représentation algorithmique des règles de conception se limite aux règles les plus formelles. De plus, de nombreuses limites du KBE en général se retrouvent dans ces applications. Verhagen et *al.* [74] identifient parmi les principales limites du KBE, une tendance au développement de boîtes noires, nécessitant des connaissances d'experts pour leur interprétation, leur modification et leur réutilisation. Ces limites se retrouvent dans la représentation algorithmique des règles de conception, où des connaissances habituellement non maîtrisées par les concepteurs sont nécessaires pour comprendre précisément le fonctionnement des règles, en ajouter de nouvelles ou modifier des règles existantes. Le corpus de règles de conception évoluant rapidement, cette méthode de représentation ne semble donc pas adaptée au maintien en cohérence d'un large corpus hétérogène de manuels de conception.

Ces limitations sont confirmées par notre état de l'art industriel. Sur les 37 répondants à notre questionnaire, 20 concepteurs (54.1%) utilisent régulièrement des outils d'analyse des modèles CAO. Le pourcentage de concepteurs satisfaits ou très satisfaits de ces outils (57.7%) est similaire à celui exprimé pour les manuels de règles. Cependant, 14.4% des répondants utilisant ces outils n'en sont pas satisfaits, alors qu'aucun concepteur n'avait exprimé d'insatisfaction dans l'utilisation des manuels de conception. La proportion de concepteurs moyennement satisfaits est donc également plus faible, avec 42.9% pour les manuels de règles contre 26.9% pour les outils de recherche de règles. Contrairement aux manuels de règles, que les concepteurs maîtrisent grâce à leur expérience et à des formations, les outils de détection d'erreurs génèrent de la frustration liée à ce manque de maîtrise.

Les principales difficultés rencontrées par les répondants sont la non-détection de certaines erreurs de conception pour 57.1% d'entre eux et de trop nombreux cycles de correction pouvant nécessiter l'intervention de collègues pour 25% d'entre eux. Les répondants détaillent des situations où l'assistant cognitif impose des points bloquants non nécessaires ou empêche la poursuite de la modélisation.

Ces logiciels de détection d'erreurs restent des outils puissants pour respecter certaines règles. Cependant, ils ne traitent que des règles formelles, qui ne représentent qu'une partie des règles des manuels de conception. Ce sont aussi des outils d'analyse a posteriori qui ne permettent pas d'éviter les itérations de conception. Il est alors nécessaire de développer de nouvelles représentations numériques des règles de conception.

1.3.2 Représentation sémantique

Définitions

Dans les années 90, le développement d'internet amène de nouvelles problématiques de gestion des données. Les bases de données relationnelles, basée sur le langage SQL ("*Structured Query Language*"), ne permettent plus de stocker efficacement, à moindre coût et de façon décentralisée, les très nombreuses données mises en ligne. De nouvelles technologies de stockage des données NoSQL ("*Not Only SQL*") viennent répondre à cette problématique. Les approches NoSQL permettent de stocker de larges quantités de données tout en conservant de bonnes performances. Elles apportent aussi une flexibilité de structure que n'ont pas les bases de données relationnelles [79]. Il existe de nombreux types de bases de données NoSQL [80].

La représentation des données sous forme de graphes, aussi appelés réseaux sémantiques [81], est l'une des techniques de stockage NoSQL. Un graphe est représenté par un ensemble de triplets composés de deux nœuds reliés par une relation [82]. La structure du graphe peut être utilisée pour la recherche et la découverte d'informations [83]. L'utilisation d'un graphe permet une grande souplesse de structure et d'évolution des données. Dans la majorité des cas, une structure spécifique, appelée modèle de données [84], est créée pour un domaine précis et un ensemble de fonctionnalités attendues. Un graphe doté d'un modèle de données est appelé un graphe de connaissances ou une ontologie de domaine [85]. Un graphe de connaissances est donc une représentation sémantique formelle d'un domaine particulier, laquelle est essentielle pour de nombreuses méthodes de raisonnement automatique. Dans leur revue de l'état de l'art, Ji et al. [82] listent de multiples méthodes de modélisation et cas d'application des graphes de connaissances. Dans le domaine de la conception de produit, on peut citer des applications pour la représentation du processus de conception [86], pour la gestion des exigences [87], pour la recherche et la réutilisation de modèles numériques [88] ainsi que pour la continuité numérique dans les systèmes PLM [89], [90].

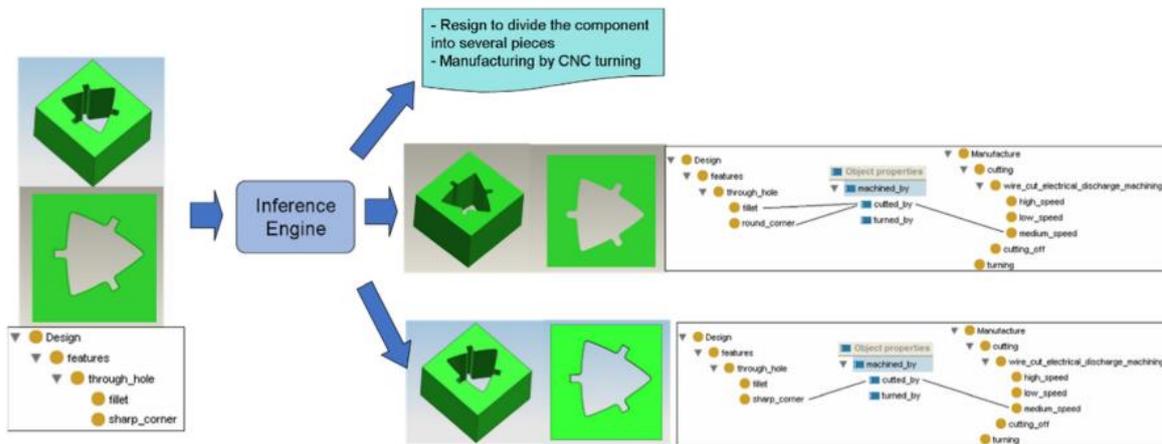


Figure 8 : Fusion des ontologies représentant le modèle CAO et le procédé d'usinage [91]

La représentation sémantique des règles de conception repose sur des représentations sémantiques de modèles CAO [92]. Dans l'exemple de la Figure 8 ci-dessus, le graphe du modèle CAO est fusionné avec une ontologie décrivant un procédé de fabrication. Les règles de conception sont alors représentées par des règles logiques (Figure 9) qui, à partir d'un moteur d'inférence, vérifient la représentation sémantique de la pièce CAO.

(Rule 2) hole(?x) ∧ diameter(?x,?y) ∧ ordinary_drilling(?z) ∧ drilled_by(?x,?z) ∧ swrlb:greaterThan(?y, 70) → has_irrationality(?x, "oversize")	(Rule 1) hole(?x) ∧ diameter(?x,?y) ∧ swrlb:lessThan(?y,10) ∧ drilling(?z)→machined_by(?x,?z)
---	---

Figure 9 : Exemple de représentations sémantiques de deux règles de conception [91]

Langages et outils de modélisation

Pour travailler sur un graphe de connaissances, il est nécessaire d'adopter un langage pour structurer les données, ainsi qu'un langage de requête pour interagir avec ces données structurées. Parmi les couples structure/requêtes les plus utilisés, on peut citer le langage de structure RDF [93] pour "Resource Description Framework" associé au langage de requête SPARQL [94] pour "SPARQL Protocol And RDF Query Language". Plus récemment, la combinaison OWL [95] pour "Ontology Web Language" et SWRL [96] pour "Semantic Web Rule Language" est mise en avant par la communauté scientifique. L'utilisation d'une base de données orientée graphe telle que NEO4J [97] avec ses APIs (Java, Python, C#, etc.) et associé au langage de requêtes CYPHER [98] permet, d'une part, une grande souplesse d'interaction avec le graphe et, d'autre part, une intégration avec d'autres logiciels métiers (e.g., CAO, simulation etc.). La principale différence entre ces deux représentations est que les ontologies sous OWL disposent nativement de règles logiques et de moteurs d'inférences permettant de raisonner sur le graphe. Ces règles ne sont pas présentes nativement dans une base de données orienté graphe type NEO4J.

Exemples de la littérature

De nombreux travaux se sont penchés sur la représentation sémantique des règles de conception [91], [99]–[104]. Les outils proposés utilisent des ensembles de quelques dizaines de règles de conception. Ces règles sont liées à des contextes de conception précis comme l'usinage [91], l'assemblage [103] ou la tôle pliée [99]. Lorsqu'une non-conformité est détectée dans le modèle sémantique de la pièce, celle-ci est signalée au concepteur. Les outils issus de cette représentation fournissent donc également une analyse a posteriori des modèles CAO.

Limitations

Afin de pouvoir utiliser des règles de conception associées à un domaine de connaissance avec cette approche, il est nécessaire de modéliser précisément ce domaine dans un graphe de connaissances. Ces représentations sémantiques sont difficiles à développer et à entretenir [101], c'est pourquoi la plupart de ces outils considèrent uniquement les règles d'un domaine spécifique. De plus les connaissances abstraites (les règles non formelles dans notre cas) restent les plus difficiles à modéliser efficacement [62]. Des choix de modélisation différents de ceux des auteurs pourraient permettre de structurer tous les types de règles de conception dans un graphe de connaissances.

L'écriture et la modification des règles de conception sous forme de code SWRL nécessite des connaissances spécifiques que n'ont pas les concepteurs ou les experts des différents domaines. Par ailleurs, une bonne connaissance du modèle de données est nécessaire pour encoder ces règles, lesquelles sont souvent écrites manuellement par des experts en ingénierie des connaissances. Pour pallier à cette limitation et simplifier l'écriture des règles, Moitra [104] propose l'utilisation d'un pseudo code plus facile à maîtriser pour un humain mais toujours interprétable pour l'ordinateur.

La représentation sémantique des règles de conception est spécifique à un domaine d'application précis. La difficulté de développement des modèles ainsi que la complexité d'écriture et de modification des règles, rendent cette approche inadaptée pour la représentation de larges corpus hétérogènes de règles de conception. Plusieurs équipes de recherche se penchent donc sur les nouvelles techniques de traitement du langage naturel permettant de structurer directement les règles de conception en langage naturel dans toute leur diversité.

1.3.3 Traitement du langage naturel

Définitions

Le langage naturel est la seule et unique représentation qui convienne à toutes les parties prenantes d'un projet de conception et c'est donc celle-ci qui est la plus utilisée pour encoder les règles de conception. Malheureusement, le langage naturel est également la

représentation la plus éloignée du langage des machines et nécessite donc un traitement. Le traitement du langage naturel ou NLP pour “Natural Language Processing” désigne un ensemble de technologies permettant la manipulation et la compréhension de textes ou discours par des ordinateurs [105]. Ces technologies permettent de traiter efficacement des sources non structurées et d’en extraire les informations pertinentes [106], [107].

Le traitement du langage naturel est un champ de recherche très dynamique avec de nombreuses applications. Il est par exemple utilisé pour l’extraction d’exigences dans la documentation des entreprises [43].

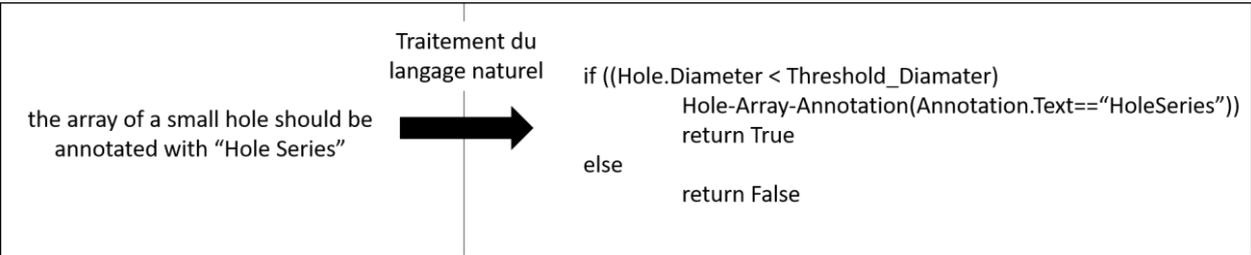


Figure 10 : Traduction d’une règle en langage naturel vers un prédicat logique [108]

Les règles de conception analysées sont représentées sous formes de tables, graphes ou formules logiques, directement issus du traitement automatique du langage naturel. Ces représentations formelles du langage naturel peuvent ensuite être utilisées par des assistants cognitifs (Figure 10 et Figure 11).

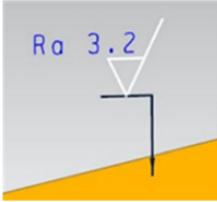
Slots	Sides	Values
Management	ID	200102
	Status	Available
	Name	Surface roughness should meet the standards
	Domain	Process planning and simulation
	Object	Surface roughness
Content	Description	Parameters of surface roughness should conform to the standards
	Rule	Find (“Ra and value of roughness”, Type = SurfRoughness. Type).Value1 == SurfRoughness.Value
	Default output	This value should conform to the standards
Complement	Severity	1: Critical
	Parameter table	Type and value of roughness
	Illustration	
Note	Derived from CY project	

Figure 11: Représentation d’une règle de conception à partir d’un traitement du langage naturel [108]

Exemples de la littérature

Le traitement du langage naturel permet de représenter numériquement les règles formelles et informelles présentes dans les manuels de conception. Dans une récente publication, Luttmer *et al.* [109] abordent la problématique de l'extraction automatique des formules accompagnant les règles formelles.

Dans l'assistant cognitif récemment proposé par Yang *et al.* [108], [110], l'analyse du langage naturel permet aux concepteurs et aux différents experts de procéder d'exprimer de nouvelles règles de conception en langage naturel. L'hétérogénéité de l'ensemble des règles de conception pousse les auteurs à adopter différentes représentations selon le type de règles. Ainsi, les règles les plus formelles sont représentées par des prédicats logiques (Figure 10). Les règles informelles sont représentées par des tableaux listant les éléments de conception impliqués, sans détailler tous les liens logiques entre ces éléments. L'assistant cognitif fourni ensuite une analyse a posteriori de la qualité d'un modèle de données. Le compte rendu généré comporte les règles de références en langage naturel afin de faciliter la compréhension des concepteurs.

On peut également relever les travaux de Kim *et al.* [111], qui proposent un assistant de conception basé sur une extraction et une recommandation des exigences dans des documents en langage naturel. Les auteurs explorent les techniques d'intelligence artificielle, le *Deep Learning* par exemple, pour l'interprétation des intentions de conception transmises dans les manuels de règles.

L'utilisation d'outils d'analyse du langage naturel permet donc, en théorie, d'identifier et de numériser l'ensemble des règles de conception présentes dans les manuels de règles. L'extraction des informations formelles de ces règles peut permettre l'automatisation de leur application. De plus, aucune connaissance spécifique n'est nécessaire aux concepteurs et experts pour écrire de nouvelles règles ou modifier les règles existantes. Cette flexibilité permet de suivre les évolutions des connaissances de l'entreprise, au moins aussi efficacement que les manuels de conception en langage naturel.

Limitations

Les technologies d'analyse du langage naturel pour l'extraction automatique des règles de conception des manuels spécialisés sont récentes et présentent encore de nombreuses limitations. Contrairement aux humains, la taille des manuels de règles n'est pas un problème pour les ordinateurs. En revanche de nombreux facteurs viennent complexifier l'analyse de ces documents. Les énoncés de règles de conception sont souvent exprimés avec un langage technique spécifique à un domaine particulier. De plus ils sont en général courts et rédigés avec une économie de mots alors que de nombreux procédés de traitement du langage naturel nécessitent de grandes quantités de mots.

L'extraction de règles complexes ainsi que la représentation numérique des schémas et des graphiques restent à améliorer ou à développer. De plus, l'extraction automatique des règles

est encore limitée à des domaines spécifiques pour lesquels des ontologies détaillées des connaissances et du vocabulaire existent. Ces verrous techniques limitent à l'heure actuelle la possibilité de capturer efficacement les règles de conception de différents domaines.

Néanmoins, les récentes avancées dans ce domaine, ainsi que son potentiel pour le développement d'assistants cognitifs, laissent présager d'un progrès rapide des connaissances sur ce sujet.

1.3.4 Des assistants cognitifs centrés sur la CAO

La majorité des outils présentés dans cet état de l'art ont une approche similaire, à savoir que leur objectif est de détecter des erreurs de conception dans un modèle CAO [73], [76]–[78], [91], [92], [99]–[104], [108], [110], [112]–[115]. Dans ce mémoire, nous qualifions ces approches de centrées sur la CAO. Ces assistants cognitifs peuvent être rangés dans la catégorie des outils pour la qualité des modèles CAO. González-Lluch et al. [116] proposent une revue de la littérature de ces outils. Dans cette partie, nous allons revenir sur les caractéristiques et les limitations communes à ces outils et démontrer le besoin d'une nouvelle approche d'utilisation des règles de conception.

Détection d'erreur dans le modèle CAO

Les assistants cognitifs utilisant une approche centrée sur la CAO ont tous pour objectif de détecter des erreurs de conception dans les modèles numériques des pièces. Plusieurs conséquences découlent de cette approche.

Les règles prises en compte sont le plus souvent formelles et géométriques. Dans la partie 1.2 consacrée aux règles de conception, nous donnions l'exemple de règle non formelle suivant : "Tout choix d'outils de fraisage non standards devra être validé en amont par le bureau des méthodes". Cette règle n'est pas directement reliée à la géométrie de la pièce finale et peut donc difficilement être intégrée dans un assistant cognitif centré sur la CAO.

La détection d'erreurs a posteriori dans le modèle CAO implique que le concepteur consacre du temps à la correction de ces erreurs. Il en résulte des cycles de vérification/correction qui peuvent être complexes et fastidieux pour le concepteur. Les assistants cognitifs centrés sur la CAO raccourcissent ces cycles mais ne les suppriment pas. Dans une approche de conception agile [117], ces cycles de correction sont considérés comme gâchés car ils n'apportent aucune valeur ajoutée supplémentaire au produit.

Une utilisation réactive des règles de conception

Le fonctionnement d'un assistant cognitif centré sur la CAO implique de vérifier les règles de conception sur une pièce ayant déjà été partiellement ou totalement modélisée. Les règles sont donc appliquées a posteriori pour détecter les erreurs déjà commises. Un objectif plus aligné avec la conception Lean – i.e., au juste besoin –, serait de limiter le nombre d'erreurs

commises par les concepteurs et de tendre vers des pièces acceptables dès la première tentative de conception. Pour cela, il est nécessaire de développer une approche pour guider le concepteur vers une meilleure compréhension et utilisation des règles de conception. Ce manque de soutien et d'orientation du travail des concepteurs dans les outils existants est d'ailleurs souligné par González-Lluch et al. [116].

1.3.5 Synthèse de l'état de l'art sur les représentations numériques des règles de conception

Afin de développer un assistant cognitif dédié aux règles de conception, il est nécessaire d'en adopter une représentation numérique structurée. Dans cette partie, nous avons étudié les différentes représentations existantes dans la littérature avec les outils qui leurs sont associés. Nous en avons déduit que l'ensemble des outils existants se basent sur une approche centrée sur la CAO. Cette approche se caractérise par la détection d'erreurs de conception dans le modèle numérique des pièces conçues et donc par une application réactive des règles de conception qui se limite souvent à la vérification d'expressions mathématiques de propriétés géométriques.

Les limitations propres aux modes de représentations étudiés ainsi que celles inhérentes à des outils d'analyse a posteriori mettent en lumière le besoin d'une nouvelle approche pour accompagner et guider le concepteur dans la mise en œuvre des règles de conception. La partie suivante de l'état de l'art présente cette approche ainsi que les différentes briques technologiques d'un assistant intelligent fondé sur cette approche.

1.4 Une approche centrée sur le concepteur

1.4.1 Informatique ubiquitaire

L'informatique ubiquitaire est un concept proposé en 1991 par Weiser dans un article intitulé "The Computer for the 21 st Century" [118]. Il y décrit les technologies permettant d'intégrer de façon fluide l'informatique dans les activités humaines. Cette intégration repose sur de nombreuses technologies permettant d'interagir avec l'utilisateur, d'interpréter ses comportements pour en déduire des besoins de façon autonome [119], [120]. Les récentes évolutions des sciences du numérique permettent aujourd'hui de se rapprocher de cette vision.

Le besoin d'intégrer de façon fluide l'utilisation des règles de conception dans le processus de conception s'inscrit dans une démarche de développement ubiquitaire. Dans cette partie,

nous allons réaliser un état de l'art de deux technologies essentielles à cette démarche, la sensibilité au contexte [121], [122] et les systèmes de recommandation [123].

1.4.2 Sensibilité au contexte

Définition

Un logiciel est dit sensible au contexte, lorsqu'il a la capacité de mesurer et de réagir à des informations contextuelles [124]. Une information est considérée comme contextuelle dès lors qu'elle concerne directement ou indirectement l'utilisateur ou le logiciel lui-même [125]. A partir d'une analyse basée sur la théorie de l'activité, Cassens et al. [126] divisent les informations contextuelles en deux catégories : les informations relatives à l'environnement et au domaine sont fixes et n'évoluent pas avec l'activité de l'utilisateur. Les informations relatives à l'activité de l'utilisateur évoluent quant à elles en temps réel en fonction des actions de celui ou celle-ci.

Un logiciel sensible au contexte analyse donc les données contextuelles afin de fournir à l'utilisateur, des informations et services adaptés à l'activité de celui ou celle-ci [125], [127]–[130]. Des logiciels sensibles au contexte sont utilisés dans de très nombreux domaines. Les approches sensibles au contexte sont couramment utilisées pour la recherche et la recommandation d'informations [131], [132]. L'objectif est de présenter aux utilisateurs les informations dont ils ont besoin pour leur activité.

Outils sensibles au contexte dans l'industrie manufacturière

Dans l'industrie manufacturière, on retrouve plusieurs exemples d'outils sensibles au contexte. Dhuieb et al. [133] développent une application pour recommander, en temps réel, les informations nécessaires au travail d'ouvriers en fonction de leur contexte. Plusieurs autres outils sensibles au contexte ont été proposés par la communauté scientifique pour des applications en usine [134]–[136]. Ces outils permettent notamment d'adapter les informations recommandées et les services fournis en fonction du niveau d'expertise des utilisateurs.

Il existe peu d'exemples d'outils sensibles au contexte dédiés à la conception. On peut noter les travaux de Rowson et al. [137], lesquels avancent l'idée d'un outil de recommandation de pièces déjà conçues en fonction du contexte des concepteurs, notamment à partir d'une analyse des interactions homme-machine. Kim et al. [111] évoquent aussi la possibilité d'interpréter contextuellement les besoins des concepteurs afin de recommander des règles adaptées. Les auteurs concentrent leur travail sur les techniques d'interprétation du langage naturel et de recherche de règles. La sensibilité au contexte est par conséquent peu explorée par les auteurs. Ces travaux présentent donc l'assistant de

conception sensible au contexte comme un objectif de recherche souhaitable. En effet, la possibilité pour un assistant cognitif de répondre en temps réels aux besoins du concepteur en lui apportant les informations avec parcimonie au vu de son contexte est l'une des clés pour le développement d'un assistant centré sur le concepteur.

Modéliser les informations contextuelles

Comme pour la modélisation de graphes de connaissances, il n'existe pas de méthode établie pour modéliser des informations contextuelles. On trouve donc dans la littérature autant de modèles que d'applications. Dans cette partie, nous allons identifier les structures les plus répandues ainsi que les méthodes et démarches existantes pour la modélisation de contextes de conception.

Da Cunha Mattos et al. [138] proposent l'une des rares tentatives de modélisation du contexte dans un cas général (Figure 12). On y retrouve la position centrale de l'utilisateur, ses tâches, ainsi que les différents humains, logiciels ou machines avec lesquels il est en interaction. Ils présentent également une ontologie décrivant la structure et les processus des logiciels sensibles au contexte. L'approche la plus courante est la division d'un contexte global en différents sous-contextes plus spécifiques. Gu et al. [139] proposent un modèle général permettant de relier plusieurs sous-contextes spécifiques à plusieurs domaines.

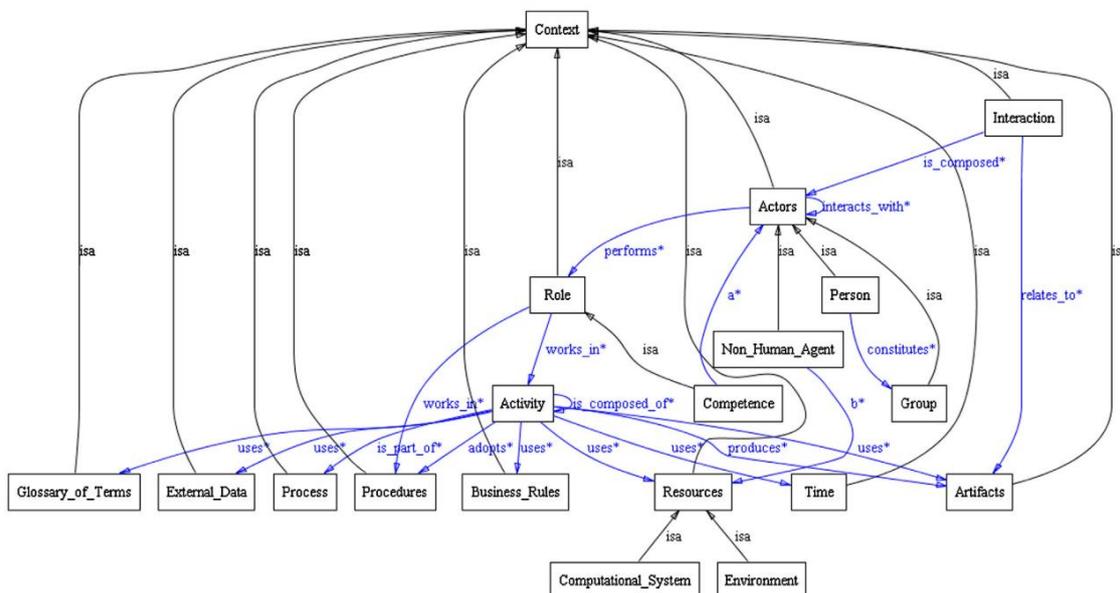


Figure 12: Modèle des données contextuelles proposé par Da Cunha Mattos et al. [138]

Ces modèles de données contextuelles spécifiques à un domaine d'application sont les plus nombreux dans la littérature. On retrouve des modèles pertinents pour le fonctionnement d'usines [133], l'éducation [140], la recherche d'informations [141], [142] et les applications mobiles [143]. On peut tirer plusieurs conclusions de l'analyse de ces différents exemples. Dans leur revue des modèles de données contextuelles, Alami Merrouni et al. [144] insistent

sur l'importance d'un cadre pour la modélisation des données contextuelles. Ce cadre prend systématiquement la forme d'une taxonomie, séparant les données contextuelles en plusieurs sous-ensembles cohérents, que nous appellerons sous-contextes dans ce mémoire.

Pour représenter le contexte en usine, Dhuieb et al. [133] considèrent par exemple trois sous-contextes : un sous-contexte opérationnel qui comprend les tâches et activités des salariés, un sous-contexte organisationnel comprenant l'organigramme de l'entreprise et un sous-contexte de l'utilisateur comprenant les compétences et expertises de celui ou celle-ci. Dans le domaine de la recherche d'informations sensible au contexte, Tamine-Lechani et al. [141] proposent l'une des taxonomies les plus abouties, composée de 5 sous-contextes (Figure 13).

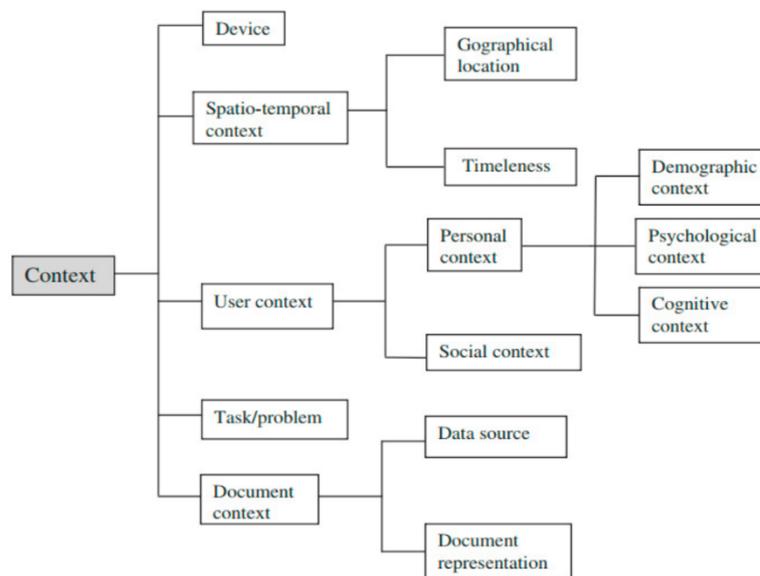


Figure 13: Taxonomie du contexte en recherche d'information [141]

A notre connaissance, il n'existe pas de modèle pour modéliser un contexte de conception dans l'industrie. Les publications présentant des approches sensibles au contexte dans ce domaine [111], [137] ne détaillent ni la capture des informations contextuelles ni leur structuration.

1.4.3 Systèmes de recommandation

La recommandation d'informations à partir d'un graphe de connaissances est un élément essentiel de l'informatique ubiquitaire. L'objectif d'un algorithme de recommandation est d'extraire, d'une base de données, des informations pertinentes au vu du besoin d'un utilisateur. Les systèmes de recommandation sont souvent classés en deux grandes catégories : la recommandation collaborative et la recommandation par le contenu. Cependant, la recherche sur les systèmes de recommandation est très active et de nouvelles

approches sont régulièrement proposées et testées par la communauté scientifique [145], [146]. Dans cette partie, nous allons étudier l'état de l'art des systèmes de recommandation et lister les approches les plus fréquentes dans le but d'identifier les mieux adaptées à notre contexte.

Recommandation collaborative

La recommandation collaborative est basée sur une hypothèse sociale qui stipule que des utilisateurs consultant les mêmes contenus ou les notant de façons similaires, partageront probablement les mêmes intérêts. Un utilisateur se verra donc recommander des éléments avec lesquels des profils similaires ont interagis. Pour faire des recommandations, les algorithmes se basent sur les goûts des utilisateurs en analysant leurs évaluations ou leur activité. Cette approche est très courante sur les réseaux sociaux [147] ou pour les recommandations de films [148] par exemple.

Ces algorithmes reposent souvent sur un graphe pondéré bi-parti composé de deux labels : les utilisateurs et les items [149], [150]. La Figure 14 donne un exemple de graphe bi-parti pour la recommandation collaborative. Les relations pondérées entre utilisateurs et items correspondent souvent à des notes ou à des commentaires d'utilisateurs. Ces données sont utilisées par les algorithmes pour calculer des scores de similarités entre les utilisateurs et les articles. Un utilisateur se verra alors recommander les articles avec lesquels il a le plus haut score. Une revue des systèmes de recommandation collaboratifs est proposée par Su et Khoshgoftaar [151]. On peut également noter la proposition de Huang et al. d'un système de recommandation collaboratif et sensible au contexte [152].

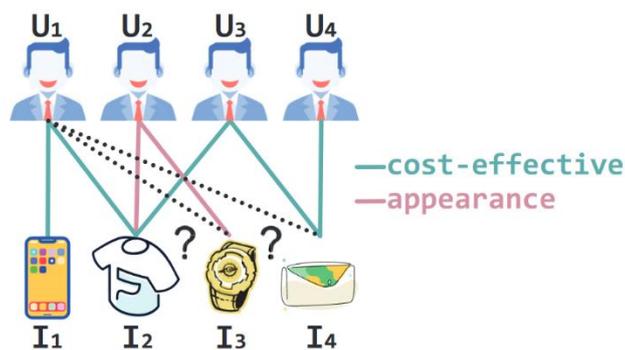


Figure 14: Exemple de graphe bi-parti pour la recommandation collaborative [150]

Recommandation par le contenu

La recommandation basée sur le contenu utilise un set de tags (concepts, sujets, domaines, etc.) pour décrire les utilisateurs (centres d'intérêt, âge, sexe, etc.) et les articles (catégorie, coût, etc.) [153]. Ces tags sont attribués par les utilisateurs lors de la création d'un profil ou

lors de la publication d'un item. Ils peuvent aussi être déduits de l'activité des utilisateurs. Le système de recommandation calcule alors des scores de similarité basés sur le nombre de tags communs entre un utilisateur et des articles ou d'autres utilisateurs. De nombreuses méthodes de calcul de la similarité existent, cependant, la méthode cosinus est la plus répandue [154].

Analyse des structures de graphes

Le récent déploiement des technologies de traitement du langage naturel et de sensibilité au contexte a mené à de nouveaux types de graphes plus hétérogènes pour lesquels de nouvelles méthodes de recommandation ont dû être inventées. Ces nouvelles méthodes, appelées analyse des parcours, se basent sur l'étude de la structure des graphes. Le nombre de parcours entre deux nœuds ainsi que la longueur de ces parcours peuvent être utilisés pour calculer un score de similarité entre ces nœuds [155], [156]. Dans le cadre du traitement du langage naturel, cette méthode est répandue pour calculer des similarités sémantiques entre des textes, phrases ou mots [157]–[159].

Pour faire des recommandations, les algorithmes utilisant cette approche considèrent un ensemble de nœuds, sélectionnés par l'utilisateur ou le système, et qui représentent le besoin de l'utilisateur ou son contexte [83]. Ils recommandent alors les nœuds les plus similaires à cet ensemble. Cependant, les calculs de similarité de ce type sont complexes et requièrent l'exploration de tous les parcours existants entre tous les nœuds concernés. Ces calculs ne semblent donc pas adaptés à de la recommandation en temps réel sur un graphe évolutif de données contextuelles.

Plusieurs méthodes sont donc spécifiquement adaptées à la recommandation contextuelle. Bogers [160] propose un algorithme nommé ContextWalk, lequel se base sur l'analyse de parcours aléatoires dans le graphe. Dans un graphe de N nœuds, l'auteur considère un espace vectoriel de dimension N , chaque dimension représentant un nœud. Il définit un vecteur de position probabiliste V où $V(i)$, la valeur de V pour la dimension i , est égale à la probabilité pour que la position de la marche aléatoire soit sur le nœud i . Le vecteur V , respecte donc l'équation 1 ci-dessous.

$$V(i) \in [0, 1] ; \sum_{i=1}^N V(i) = 1$$

Equation 1 : Vecteur de position

L'auteur considère de plus une matrice X appelée matrice probabiliste de transition, où $X(i, j)$ est égale à la probabilité, si la position de la marche aléatoire est sur le nœud i , que la position de la marche soit sur le nœud j au prochain pas. La matrice X permet donc

d'effectuer des pas aléatoires dans le graphe comme décrit par l'équation 2, où V_n est le vecteur de position probabiliste au pas numéro n .

$$V_{n+1} = V_n X$$

Equation 2 : Pas aléatoire dans le graphe à l'aide de la matrice de transition

La marche aléatoire est initialisée par le vecteur de position initiale V_0 qui représente le contexte et le besoin de l'utilisateur. De façon similaire aux autres technologies d'analyse des parcours, les nœuds de départ peuvent être sélectionnés par le système ou l'utilisateur lui-même. Cette approche a l'avantage de considérer l'ensemble du graphe et des sous-contextes existants à chaque recommandation. Après un nombre n de pas dépendant de la taille du graphe exploré, le système lit le vecteur V_n et recommande les nœuds associés à la plus forte probabilité dans une catégorie souhaitée. Cette catégorie peut être un label spécifique, comme le label film dans l'exemple de Bogers, mais elle peut aussi être un sous-contexte afin de suggérer des éléments contextuels pertinents pour de futures recommandations.

1.4.4 Synthèse de l'état de l'art sur une approche centrée sur le concepteur

Dans la partie précédente, nous avons démontré le besoin d'une nouvelle approche centrée sur l'utilisateur afin d'améliorer l'utilisation des règles de conception. Dans cette partie, nous avons analysé les différentes technologies permettant de mettre en place cette nouvelle approche.

Cette approche s'inscrit dans le cadre de l'informatique ubiquitaire, un ensemble de technologies visant à l'intégration fluide de l'informatique dans les activités humaines. Elle repose sur deux piliers technologiques.

La sensibilité au contexte est la capacité qu'a un logiciel de réagir à son environnement. Le contexte est un concept large regroupant les informations relatives à l'utilisateur du logiciel, au logiciel lui-même ou à leur environnement. Plusieurs outils industriels utilisent déjà cette approche, notamment pour la recommandation d'informations dans des usines en fonction du contexte des différents ouvriers [134]–[136]. Les informations contextuelles sont généralement structurées en différentes dimensions ou sous-contextes. Cependant, il n'existe aucun modèle permettant de représenter le contexte d'un concepteur dans l'industrie manufacturière.

Les systèmes de recommandations sont des algorithmes permettant de recommander des données à un utilisateur à partir d'un graphe de connaissances. Différentes approches

permettent de faire des recommandations personnalisées à un utilisateur. Les méthodes d'analyse de la structure du graphe, notamment celles de marches aléatoires dans le graphe, permettent la prise en compte de l'ensemble du graphe de connaissances lors des recommandations et semblent donc plus adaptées à notre besoin.

La démocratisation de ces deux technologies nous permet d'envisager le développement d'un assistant intelligent, effectuant des recommandations de règles de conception en fonction du contexte du concepteur pour améliorer la maîtrise des règles de conception.

1.5 Conclusion de l'état de l'art

1.5.1 Synthèse de l'état de l'art

Afin d'identifier quel outil mettre en œuvre pour améliorer la maîtrise des règles de conception, nous avons réalisé un état de l'art autour de ces règles et des outils existants tentant d'améliorer leur maîtrise.

Dans un premier temps, nous avons étudié les manuels non structurés de règles de conception utilisés dans l'industrie manufacturière. Un questionnaire à destination de concepteurs professionnels nous a permis d'analyser leurs expériences et ressentis dans l'utilisation de ces manuels. Les difficultés exprimées par les répondants, qui concernent notamment les recherches de règles dans la documentation, démontrent la nécessité d'assistants cognitifs à la conception dédiés à la maîtrise de ces règles.

L'objectif d'un assistant cognitif est de faciliter des activités complexes ou répétitives. Les assistants cognitifs appartiennent au domaine des logiciels intelligents. Ils sont capables de raisonner sur des données afin de réaliser des tâches jusque-là réservées aux humains. Afin de développer un assistant cognitif dédié aux règles de conception, deux problématiques sont à prendre en compte. Premièrement, l'assistant ne doit pas nuire à la maîtrise des règles de conception des utilisateurs. Un effet boîte noire peut amener à de la frustration chez les concepteurs ainsi qu'à une perte de compétences. Deuxièmement, une représentation numérique structurée des règles de conception est essentielle pour le fonctionnement d'un tel assistant. Les fonctionnalités d'un assistant cognitif dédié à la maîtrise des règles de conception dépendront donc fortement du type de représentation utilisée.

Afin d'étudier les représentations numériques des règles de conception, nous avons analysé l'ensemble de ces règles. Nous avons défini le concept de règle de conception comme un énoncé à l'impératif prescrivant au concepteur une action augmentant les chances d'obtenir un résultat positif. L'ensemble de ces règles est fortement hétérogène. Nous avons mis en place une taxonomie décrivant cette hétérogénéité sur trois axes, le niveau de formalisation, le niveau d'impératif et les différentes origines des règles de conception.

Nous avons ensuite réalisé une revue des approches existantes pour représenter numériquement les règles de conception. Ces approches sont à la base des différents assistants cognitifs existant visant à une utilisation plus efficace des règles de conception. Cette analyse nous a permis d'identifier une approche commune, centrée sur la CAO, aux outils existants. Cette approche se focalise sur la détection d'erreurs de conception dans le modèle numérique. Elle ne permet pas de traiter l'ensemble des règles de conception en vigueur et induit de longs cycles de correction n'apportant pas de valeur ajoutée au processus de conception. Nous en déduisons la nécessité de proposer une nouvelle approche centrée sur l'utilisateur.

L'approche centrée sur le concepteur s'inscrit dans le cadre de l'informatique ubiquitaire et vise donc à intégrer de façon fluide l'utilisation des règles dans le processus de conception. Elle repose sur deux axes technologiques. Le premier axe est la sensibilité au contexte, définie comme la capacité pour un logiciel d'analyser et de réagir en fonction de son contexte d'utilisation. Le deuxième axe concerne les systèmes de recommandation, ce sont des algorithmes permettant de proposer certaines données de façon personnalisée à un utilisateur. Ces deux axes nous permettent d'envisager le développement d'un assistant intelligent, capable d'analyser le contexte de conception d'un utilisateur afin de lui recommander, en temps réel, les règles de applicables à son contexte de conception.

L'analyse de l'état de l'art nous permet d'établir le positionnement scientifique de nos travaux ainsi que l'hypothèse de recherche de la thèse.

1.5.2 Positionnement scientifique

Nos travaux de thèse visent à améliorer le processus de conception en proposant un assistant intelligent dédié aux règles de conception de l'industrie manufacturière. Ils s'inscrivent donc dans le cadre de sciences de conception.

La revue des assistants cognitifs dédiés aux règles de conception nous a permis de montrer les limites des analyses a posteriori de modèles CAO. Nous en avons déduit la nécessité d'un assistant intelligent basé sur nouvelle approche, centrée sur le concepteur. Cette approche permet une application a priori des règles de conception, grâce à des recommandations de règles adaptées au contexte de conception de l'utilisateur.

Les systèmes de recommandation les plus adaptés à ce besoin sont basés sur l'analyse de la structure de graphes. Un graphe de connaissances dont le modèle de données permet de représenter des règles de conception ainsi que le contexte de conception de l'utilisateur, est donc nécessaire pour effectuer ces recommandations.

Nous avons vu dans l'état de l'art que les techniques de traitement du langage naturel permettent de structurer tous les types de règles de conception sous forme de graphe. De

plus, l'utilisation du langage naturel pour la représentation des règles facilite l'écriture et la modification de celles-ci par les concepteurs.

Le graphe de connaissances de l'assistant intelligent intègre donc trois axes scientifiques (Figure 15) :

- La représentation des informations contextuelles du processus de CAO
- La représentation de règles de conception en langage naturel
- L'utilisation d'un système de recommandation basé sur l'exploration de la structure du graphe

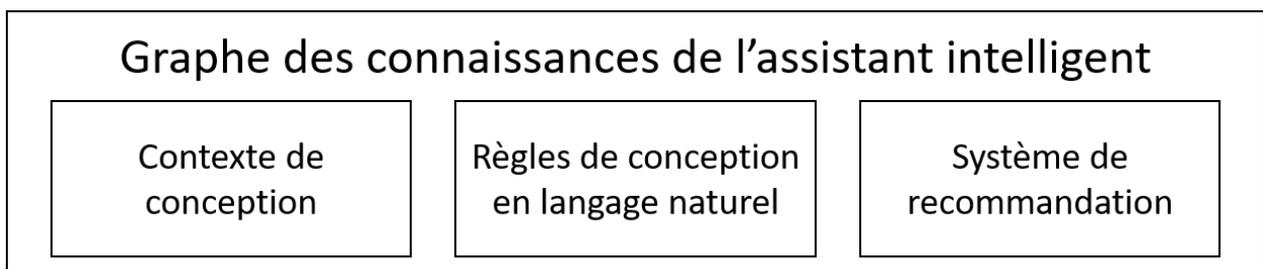


Figure 15 : Axes scientifiques intégrés dans le graphe de connaissances de l'assistant intelligent

1.5.3 Hypothèse de recherche

Suite à la présentation du contexte de nos travaux, nous avons posé la question de recherche suivante :

QUESTION DE RECHERCHE

Comment améliorer l'efficacité du processus de Conception Assistée par Ordinateur par une meilleure maîtrise des règles de conception ?

L'analyse de l'état de l'art nous a permis de mettre en évidence la nécessité d'un assistant cognitif pour l'utilisation des règles de conception reposant sur une approche centrée sur le concepteur. La démocratisation de nouvelles technologies de structuration de l'information, d'analyse du langage naturel, de recommandations personnalisées et de sensibilité au contexte, permet d'envisager le développement d'un assistant à la conception intelligent. L'objectif de cet assistant est de guider le concepteur dans son utilisation des règles de conception. Cet assistant doit répondre aux exigences suivantes :

- L'assistant intelligent doit être en mesure de recommander à un concepteur, en temps réel, des règles applicables à son contexte de conception.

- L'utilisation de l'assistant intelligent doit permettre une meilleure maîtrise de l'ensemble des règles de conception. Par maîtrise, on entend la possibilité de traiter l'ensemble des règles, d'assurer le suivi de leur utilisation et de faciliter leur recherche.
- Les recommandations de règles de l'assistant intelligent doivent permettre d'améliorer l'efficacité du processus de Conception Assisté par Ordinateur. Cette efficacité peut se mesurer par la rapidité du processus, la qualité finale des pièces conçues, ainsi que par la charge cognitive des concepteurs durant le processus.

Les constats issus de l'état de l'art nous permettent donc de préciser notre champ de recherche et de poser l'hypothèse de recherche suivante :

HYPOTHÈSE DE RECHERCHE

Des recommandations contextuelles de règles de conception permettent d'améliorer le processus de Conception Assistée par Ordinateur.

1.5.4 Méthode de résolution

Afin de valider cette hypothèse, nous nous appuyerons sur le carré de validation proposé par Seepersad *et al.* [161]. Cette méthodologie de validation applicable au domaine de l'ingénierie, permet de vérifier la pertinence d'un apport au processus de conception sur les deux critères suivants :

- La structure proposée est-elle efficace ?
- La proposition est-elle performante ?

Ces deux critères sont validés théoriquement et empiriquement. Les quatre étapes de validation de cette méthode sont illustrées dans la *Figure 17*.

La validation de notre hypothèse de recherche sera donc structurée en deux étapes. La première étape est une validation théorique de notre apport dans laquelle nous décrirons l'assistant intelligent, ses fonctionnalités et le modèle de données sur lequel il s'appuie (Chapitre 2). La seconde étape est une validation empirique de notre apport. Nous mesurerons l'impact de l'assistant intelligent sur le processus de conception au moyen d'un prototype logiciel. L'implémentation de ce prototype est détaillée dans le Chapitre 3. Une série d'expérimentations avec ce démonstrateur permettra de démontrer l'impact de notre assistant intelligent (Chapitre 4). Les résultats expérimentaux ainsi que la structure générale de l'assistant nous permettront de discuter de la performance théorique de notre approche au-delà du cas d'étude étudié dans nos travaux. La *Figure 16* représente cette méthode de résolution intégrée dans le carré de validation.

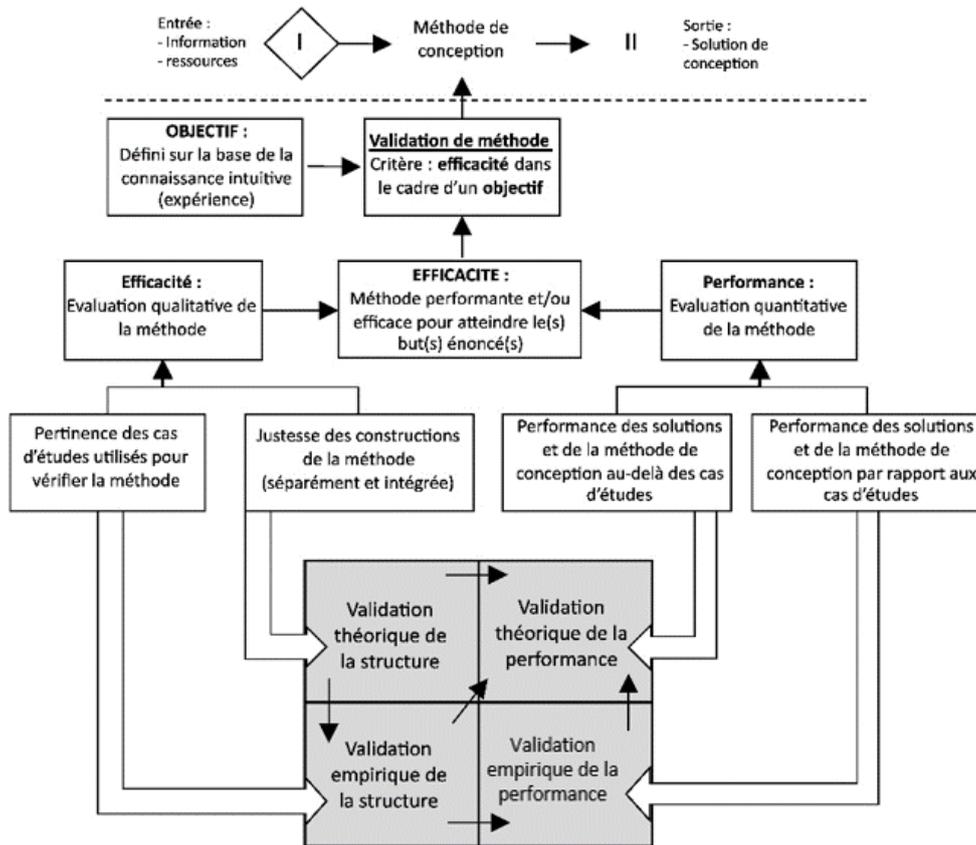


Figure 17 : Carré de validation traduit de l'anglais [161]

Une structure générique à tous les domaines de l'industrie manufacturière

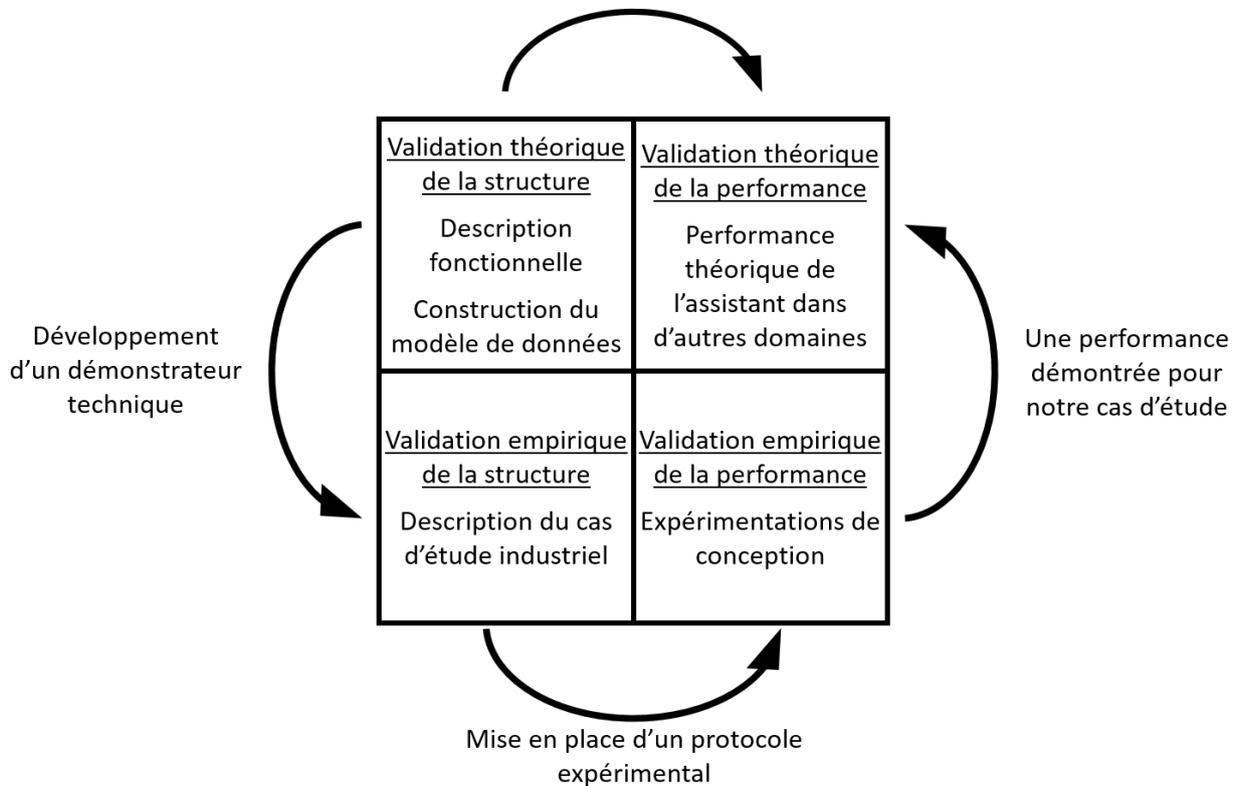


Figure 16 : Méthode de résolution adaptée du carré de validation

Le chapitre suivant est donc dédié à la description fonctionnelle de l'assistant intelligent et à la définition du modèle de données nécessaire à la représentation numérique des règles et du contexte de conception.

Chapitre 2 _ Un assistant intelligent pour la conception

Ce chapitre est dédié à la construction théorique de l'assistant intelligent. L'assistant doit permettre de recommander aux concepteurs des règles de conception applicables à leur contexte. Notre méthode de construction se décompose en deux étapes : une description des services attendus de l'assistant, suivie de la construction d'un modèle de données adapté à ces services. Ce chapitre représente la première étape de notre méthode de résolution et nous permettra de valider théoriquement la structure de notre approche (Figure 18).

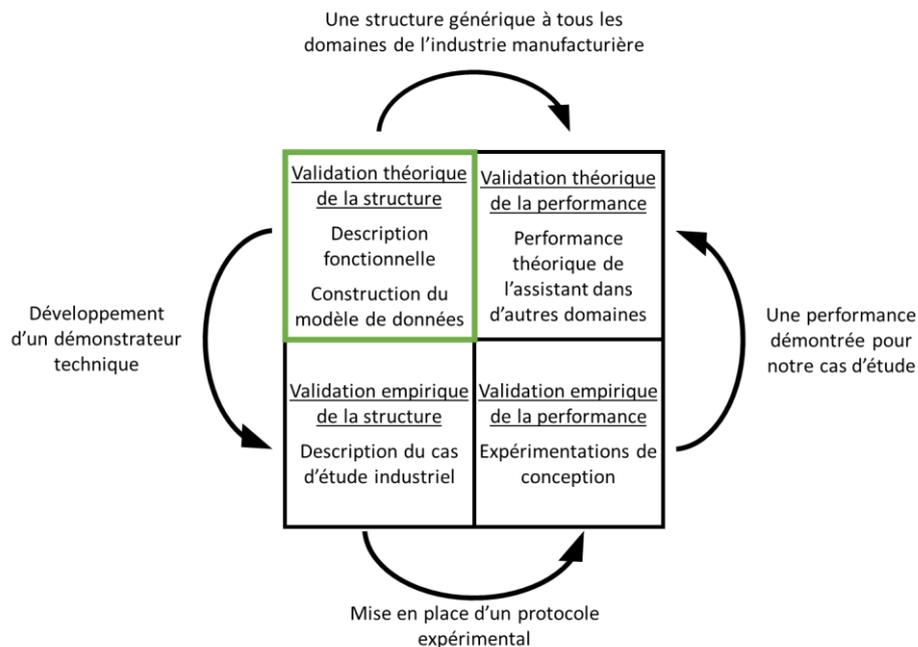


Figure 18 : Validation théorique de la structure

2.1 Description fonctionnelle

2.1.1 Présentation générale

Lors de l'état de l'art, nous avons identifié le besoin d'un outil d'aide à l'utilisation des règles de conception, centré sur le concepteur. Dans des domaines d'application proches du notre, des études ont montré qu'un assistant cognitif ubiquitaire capable de raisonner sur des données permet de répondre à ce besoin. C'est pourquoi nous proposons un assistant intelligent pour la conception intitulé CACDA : « Context-Aware Cognitive Design Assistant » :

L'assistant intelligent est un logiciel ubiquitaire capable de raisonner, en temps réel, sur les données d'un contexte de conception pour en déduire et fournir, en autonomie, un ensemble de services et/ou informations utiles au concepteur.

L'objectif principal de l'assistant intelligent est d'aider les concepteurs dans l'exploitation des règles de conception. Pour accéder à ces règles, l'assistant doit, en premier lieu, analyser les règles explicites, c'est à dire celles présentes dans les manuels de conception en langage naturel aux formats Word, PDF, etc., ainsi que dans des documents semi-structurés tels que Excel, XML et autres. Dans les grandes entreprises de l'industrie manufacturière, ces documents sont souvent rédigés dans un anglais technique afin d'être utilisés à l'international. Les règles de conception éventuellement déjà structurées dans des bases de données, relationnelles ou non, pour d'autres projets sont évidemment des sources privilégiées.

Cependant, une grande partie des connaissances de conception sont tacites et restent dans la mémoire des concepteurs ou d'une poignée d'experts [162]. L'explicitation de ces connaissances est un enjeu majeur pour leur transmission à long terme. C'est pourquoi l'environnement de conception intelligent doit encourager et simplifier l'écriture de nouvelles règles de conception de type DfX par les experts. L'utilisation du langage naturel comme premier vecteur de structure rend cette démarche aussi simple que la rédaction de manuels de conception ou de synthèses des connaissances.

Pour effectuer des recommandations adaptées au contexte de conception, l'assistant prend en compte les requêtes du concepteur et capture son contexte. En sortie, l'assistant

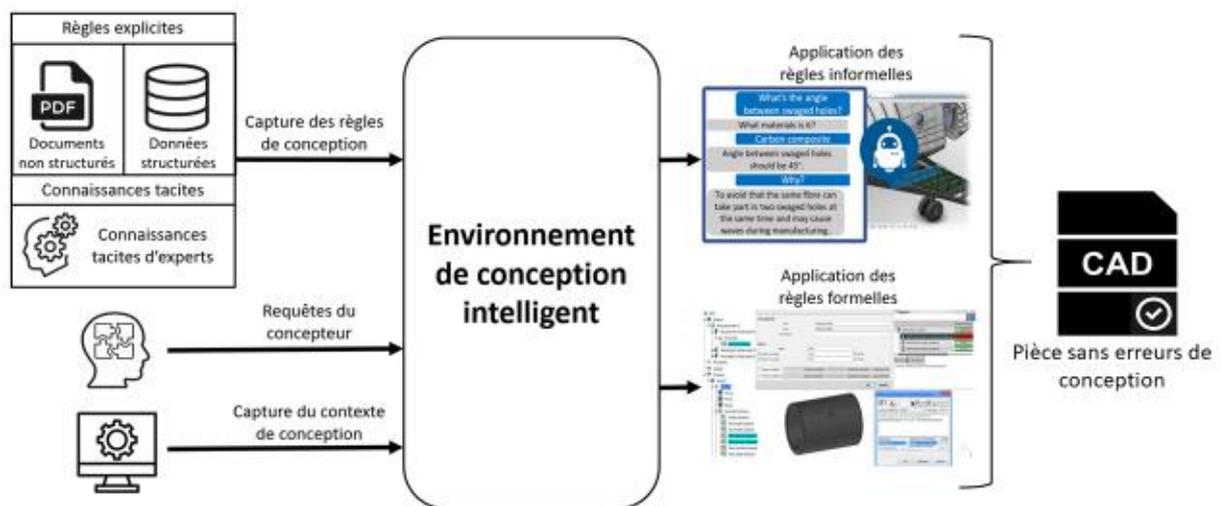


Figure 19: Schéma entrées/sorties de CACDA

accompagne le concepteur dans la mise en application des règles, formelles ou informelles, correspondant à son besoin. L'objectif final est d'améliorer la qualité des modèles CAO et de limiter le nombre d'erreurs commises. La Figure 19 schématise la fonction principale de l'assistant.

Des services secondaires découlent du déploiement de l'assistant. La récupération des données contextuelles, couplée à des technologies d'analyse de l'historique de ce contexte [163]–[165], peut permettre de détecter et d'automatiser des tâches répétitives. La

structuration des règles de conception permet également de suivre de cycle de vie de celles-ci et de recueillir des informations telles que le nombre de fois où une règle a été appliquée ? Par qui ? Dans quel contexte ? Ces informations sont cruciales pour maintenir à jour une base de connaissances.

2.1.2 Parties prenantes

L'utilisateur principal de CACDA est un concepteur dans l'industrie manufacturière. A l'heure où la majorité des grands groupes adoptent les modèles CAO comme l'une des références pour la définition de leurs pièces [166], nous considérons que le concepteur travaille exclusivement sur un système CAO tel que 3DEXPERIENCE, SolidWorks, Creo et autres. Le concepteur maîtrise son logiciel de modélisation, nous considérons donc qu'il ne rencontre pas d'obstacle technique à modéliser précisément la géométrie qu'il souhaite. C'est un concepteur généraliste qui n'a pas en mémoire l'ensemble des règles de conception applicables. Cette situation est fréquente dans l'industrie, les règles de conception sont nombreuses et difficilement accessibles. Les manuels de conception les regroupant peuvent être qualifiés de *Big Data*, dans le sens qu'ils représentent un volume de texte trop important pour être maîtrisé efficacement par un être humain [167]. De plus, un concepteur peut être amené à travailler simultanément sur plusieurs projets. Les projets d'envergure menés par de grands groupes, comme la conception d'un nouvel avion chez Airbus, font quasi-systématiquement appel à des entreprises de service telles que Capgemini, afin d'absorber la charge temporaire de conception. Ces ingénieurs doivent alors maîtriser en peu de temps les règles de conception applicables dans le domaine de leur client. Les jeunes ingénieurs n'ayant pas encore acquis d'expertise dans un domaine particulier font aussi parti des utilisateurs cibles de CACDA.

Les ingénieurs spécialisés en systèmes d'information sont responsables des bases de connaissances de l'entreprise et de leur utilisation pour la conception. Ils sont en général affectés au développement d'outils de gestion des connaissances ou à la gestion des données dans le système PLM des entreprises. Un ingénieur en système d'information est donc la personne la plus appropriée pour superviser la modélisation des règles de conception et le bon fonctionnement du graphe de connaissances. Les règles de conception étant en constante évolution, un travail de maintenance des connaissances qui se concrétise par le maintien de la cohérence du graphe est nécessaire.

2.1.3 Analyse des services de l'environnement de conception intelligent

Dans cette partie, nous réalisons l'analyse fonctionnelle du service principal de CACDA présenté dans la section 2.1.1. Le schéma fonctionnel de CACDA (Figure 20) est divisé en trois services qui permettent à l'assistant d'accompagner les concepteurs dans leurs usages des règles de conception.

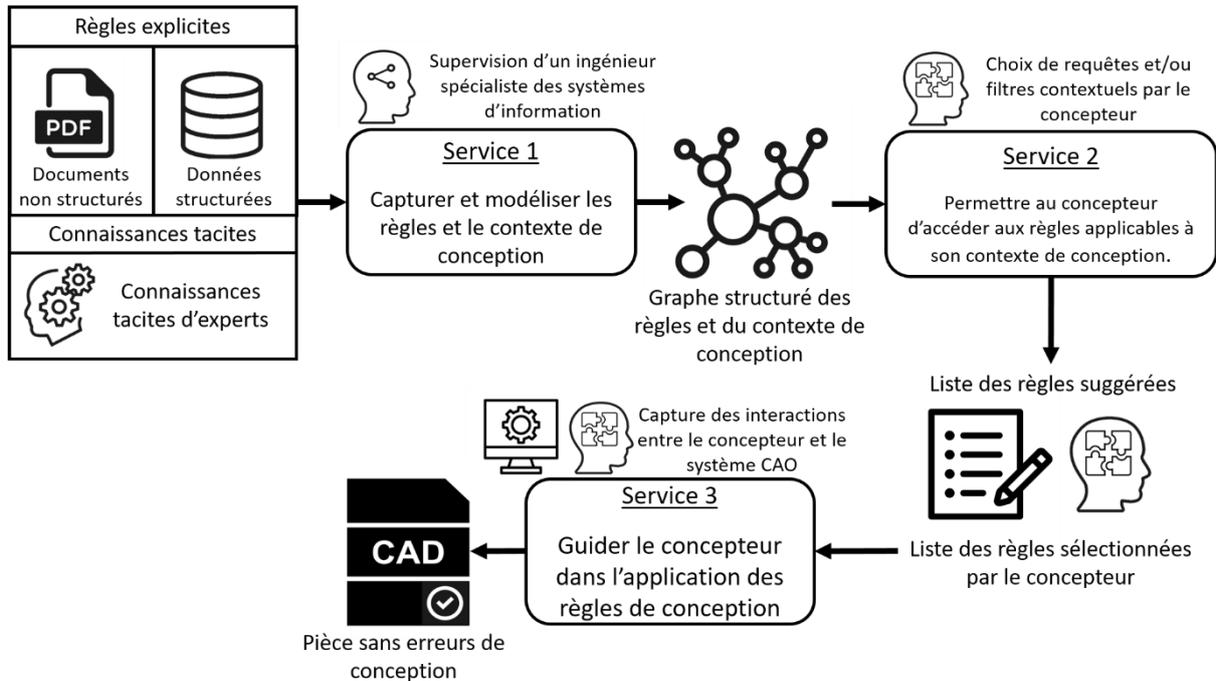


Figure 20: Schéma fonctionnel de CACDA

Service 1 : capturer et modéliser les règles et le contexte de conception

Comme évoqué lors de la revue de l'état de l'art, la construction d'un graphe de connaissances structuré est nécessaire à l'utilisation des technologies de raisonnement sur les données. Le premier service de notre assistant consiste donc à capturer les informations nécessaires à la construction de ce graphe et à les structurer dans celui-ci. Le graphe de connaissances doit permettre d'accéder à des règles de conception à partir d'éléments contextuels.

Ainsi, en entrées, cette fonction considère un ensemble de règles de conception en vigueur dans l'entreprise. Ces règles peuvent être issues de la documentation structurée ou non de l'entreprise. CACDA est capable de traiter des règles de conception en langage naturel. La formalisation des connaissances tacites des différents experts intervenant dans le processus de conception est donc facilitée. Les règles issues de connaissances d'experts sont donc également considérées en entrée de cette fonction. Ce service structure également les données contextuelles spécifiques au domaine, c'est-à-dire celles qui n'évolueront pas lors du

processus de conception. Par exemple, les dictionnaires d'acronymes en vigueur dans l'entreprise ou les spécialités des différents concepteurs de l'entreprise.

L'écriture du graphe de connaissances est réalisée selon un modèle de données adapté au fonctionnement des services suivants. La construction de ce modèle est détaillée dans la partie 2.2. Cette étape est supervisée par un ingénieur spécialiste des systèmes d'information qui s'assure de la qualité du graphe final. Il peut aussi intervenir directement sur le graphe pour améliorer les performances de l'assistant ou suite à des dysfonctionnements.

Service 2 : permettre au concepteur d'accéder aux règles applicables à son contexte de conception

Une fois le graphe de connaissances complété, l'assistant doit permettre son exploration afin que le concepteur puisse identifier les règles applicables à son contexte de conception. Ce service considère donc, en entrée, un graphe de connaissances et fournit en sortie une liste de règles correspondant au contexte de conception. Les règles de cette liste sont alors recommandées au concepteur. Il existe différentes possibilités pour recueillir le besoin du concepteur afin de lui recommander les règles appropriées :

- Le concepteur doit avoir la possibilité d'exprimer directement son besoin sous forme de **requêtes en langage naturel**. La requête de l'utilisateur est alors analysée par l'assistant et utilisée comme point de départ à une recommandation. L'assistant proposera alors au concepteur une liste de règles de conception dont l'énoncé sera sémantiquement proche des mots clés ou de la phrase saisie par le concepteur. Cette approche est la plus basique et est indispensable à tout système réalisant des recommandations.

- La recherche par requête peut s'avérer insuffisante pour retrouver les règles appropriées au besoin du concepteur. En effet, celui ou celle-ci n'a pas nécessairement une idée précise des règles recherchées. L'assistant doit donc permettre au concepteur d'explorer l'ensemble des règles de conception en utilisant des techniques d'extension de requêtes telles que la **sélection dynamique de facettes de recherche** [168], [169], laquelle permet à l'utilisateur d'orienter les résultats d'une requête. Dans notre cas, ces facettes correspondent à des éléments contextuels et permettent au concepteur de mieux décrire son contexte de conception. On parlera donc de filtres contextuels. Des propositions de synonymes aux mots utilisés par le concepteur dans sa requête sont un exemple de filtres contextuels possibles. L'assistant doit donc mettre à jour, d'une part, la liste de filtres proposés à l'utilisateur en fonction de sa recherche et, d'autre part, adapter les règles de conception recommandées en fonction des filtres sélectionnés.

- La dernière méthode d'accès aux règles de conception est la plus adaptée à un assistant cognitif ubiquitaire. Il s'agit de la **recommandation autonome** par le système de règles de conception en fonction de la dynamique du contexte de conception et de l'activité du concepteur. Contrairement aux deux méthodes précédentes, elle ne nécessite pas d'action de la part de l'utilisateur qui peut donc rester concentré sur son activité de conception.

L'assistant doit donc raisonner sur la dynamique du contexte et l'activité de l'utilisateur afin de déterminer à quel moment la recommandation doit être faite ainsi que la liste de règles à recommander.

Service 3 : guider le concepteur dans l'application des règles de conception

Une fois que le système a filtré un ensemble de règles susceptibles de correspondre au besoin du concepteur, celui ou celle-ci doit sélectionner les règles qui seront effectivement appliquées à son modèle CAO. Ces règles sont alors enregistrées comme devant être respectées sur cette pièce.

Pour faciliter le respect de ces règles, l'assistant communique avec l'environnement de CAO en utilisant l'API de celui-ci. Plusieurs approches sont alors possibles pour faciliter le respect de ces règles par le concepteur. Les règles formelles peuvent être reliées aux paramètres correspondants du modèle CAO, afin de vérifier ou d'imposer leur respect. Les informations nécessaires au respect des règles non formelles peuvent être communiquées au concepteur sous forme d'annotations du modèle, permettant de relier la règle avec l'élément géométrique concerné. Ces annotations peuvent ensuite être intégrées au modèle dans le système PLM de l'entreprise afin de mieux transmettre la démarche de conception et de faciliter la validation et la réutilisabilité du modèle [87], [170]. La Figure 21 donne un exemple d'annotations possibles pour une règle de fraisage. La règle donne une formule pour le rayon des coins de poches en fraisage. Cette formule dépendant du diamètre de fraise choisi, l'environnement de conception présente alors au concepteur un tableau des différents diamètres standards de fraises dans son entreprise.

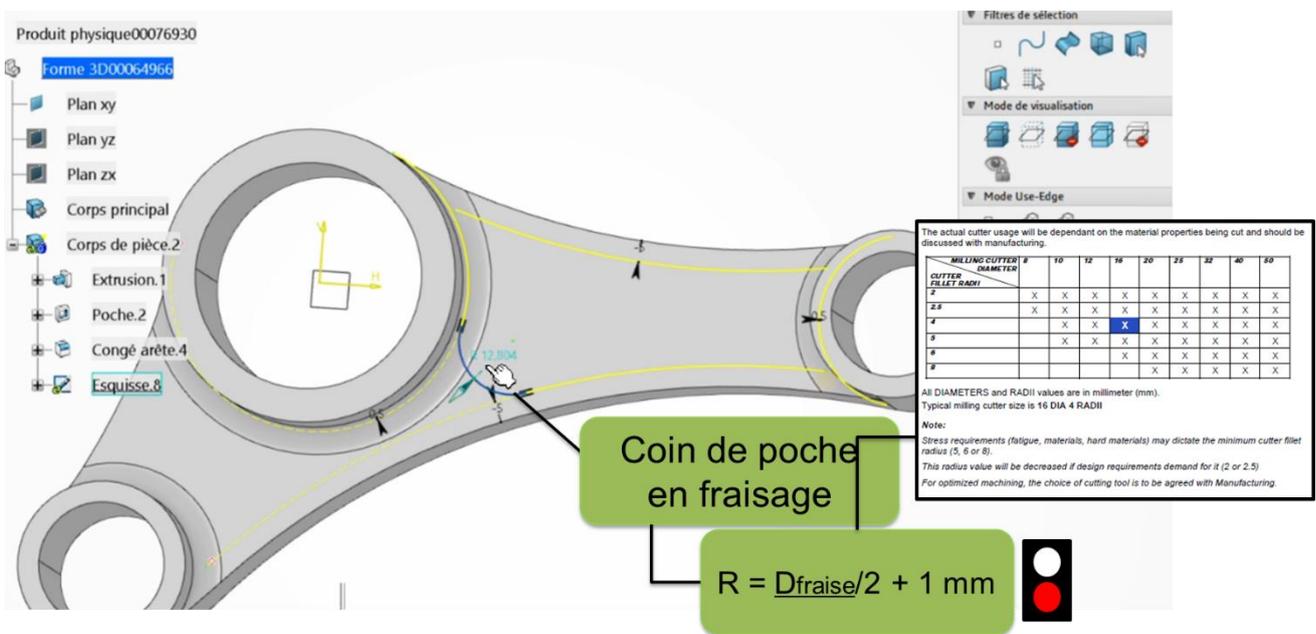


Figure 21: Exemple d'annotations pour une règle de fraisage

L'objectif final de l'assistant est de permettre au concepteur de limiter le nombre d'erreurs de conception dans son modèle et de justifier les choix de design pouvant être en contradiction avec certaines règles. Ainsi, ce service considère, en entrée, une liste de règles de conception sélectionnées par le concepteur et en sortie, le modèle CAO d'une pièce dépourvu d'erreur de conception.

C'est durant ce suivi de l'activité du concepteur que l'assistant peut construire un contexte dynamique en capturant les interactions entre le concepteur et le système de CAO. La capture de ces informations déclenche la mise à jour du graphe de connaissances et initie une recommandation automatique de règles de conception. On introduit alors une boucle de rétroaction entre les services 2 et 3.

2.2 Construction du modèle de données

Comme démontré lors de l'analyse de l'état de l'art, la construction d'un modèle de données orienté graphe adapté aux services de l'assistant et au type de données traitées joue un rôle essentiel. Dans notre cas, le modèle de données doit modéliser les règles de conception et le contexte de conception. La structure de ces données doit permettre au système de rendre le service 2 défini précédemment, c'est-à-dire de recommander des règles de conception applicables au contexte de conception. Ce contexte peut être exprimé par des requêtes de l'utilisateur, mais peut aussi être déduite de l'activité du concepteur. Dans cette partie, nous développerons donc la méthode de construction de ce modèle

2.2.1 Méthode de construction

Le modèle de données doit permettre de sélectionner des règles de conception en fonction du contexte de conception. Il est donc nécessaire de structurer les règles de conception dans le modèle. L'approche la plus directe consiste à partir des fonctionnalités attendues du logiciel et d'en déduire des structures de données adaptées. Ces structures peuvent ensuite être appelées par des requêtes permettant de répondre à ces fonctions. Dans notre cas, nous pouvons réaliser cette opération en quatre étapes :

- 1) La première étape est d'identifier une ou plusieurs questions auxquelles l'assistant doit permettre de répondre.
- 2) La deuxième étape consiste à identifier les nœuds et relations impliquées dans cette question.
- 3) La question peut ensuite être exprimée sous forme de graphe en formant un pattern continu entre les différents nœuds et relations identifiées.
- 4) Le pattern est finalement transformé en une requête qui peut être traduite dans un langage formel pour identifier la réponse à la question posée.

Les questions les plus simples se traduiront dans le graphe par une simple relation entre deux nœuds, un triplet Source/Relation/Cible (Tableau 3).

Question	Quelles règles de conception portent sur l'utilisation du matériau X ?
Pattern dans le graph	<pre> graph LR DR[Design rule] -- HAS_MATERIAL --> M[Material] subgraph DR_box [Design rule] DR_text[▪ Statement <String>] end subgraph M_box [Material] M_text[▪ Name <String>] end </pre>
Requête reliée à la question (en Cypher)	<code>(:Design rule) – [:HAS_MATERIAL] → (:Material)</code>

Tableau 3: exemple de triplet permettant de répondre à une question simple

L'utilisation d'un modèle de données orienté graphe permet de structurer des données densément connectées avec des structures complexes. Il est donc possible d'écrire des requêtes traversant de nombreuses données interconnectées afin de répondre à des questions complexes. Un exemple de ce type de question est représenté dans le Tableau 4.

Question	Quelles règles de conception sont le plus fréquemment utilisées par des collègues travaillant avec les mêmes logiciels que moi ?
Relations mises en œuvre	<pre> graph LR subgraph U1 [User] U1_text[▪ Name <String>] U1_text2[▪ Seniority <Integer>] end subgraph S [Software] S_text[▪ Name <String>] S_text2[▪ Functionality <String>] end U1 -- WORK_ON --> S subgraph U2 [User] U2_text[▪ Name <String>] U2_text2[▪ Seniority <Integer>] end subgraph DR [Design rule] DR_text[▪ Statement <String>] end U2 -- HAS_USED --> DR DR_text3[▪ Nb_of_use <Integer>] </pre>
Consolidation d'un pattern	<pre> graph LR subgraph S [Software] S_text[▪ Name <String>] S_text2[▪ Functionality <String>] end subgraph U [User] U_text[▪ Name <String>] U_text2[▪ Seniority <Integer>] end subgraph DR [Design rule] DR_text[▪ Statement <String>] end S -- WORK_ON --> U U -- HAS_USED --> DR DR_text3[▪ Nb_of_use <Integer>] </pre>
Requête reliée à la question (en Cypher)	<code>(:Software) ← [:WORK_ON] – (:User) – [:HAS_USED] → (:Design rule)</code>

Tableau 4: Exemple de requête pour une question complexe

Cette approche permet de structurer les règles par rapport aux différentes fonctionnalités attendues de CACDA. Cependant, elle ne peut pas aboutir à la définition de l'ensemble du modèle de données car il est impossible de lister de façon exhaustive l'ensemble des questions auxquelles l'assistant doit répondre. Il est nécessaire d'apporter une structure générale au contexte de conception. Lors de l'analyse de l'état de l'art, nous avons vu que la construction d'un modèle contextuel passe par la définition de sous-contextes. Un sous-contexte représente des données contextuelles émanant d'une même source ou interaction. Identifier les différents sous-contextes permet de placer les différentes informations contextuelles de façon cohérentes dans le modèle de données. La partie suivante se concentre donc sur le processus d'identification des sous-contextes du processus de conception.

2.2.2 Choix des sous-contextes

De même que pour la construction de modèles de données en général, il n'existe pas d'approche générique pour définir les sous-contextes d'un domaine. Nous appuyons donc notre choix sur une revue de modèles de données contextuelles dans des domaines proches, tels que les applications mobiles ou la recommandation d'informations en usine, ainsi que sur nos connaissances du processus de conception et de la modélisation de pièces techniques.

Afin d'identifier les sous-contextes pertinents, nous allons d'abord lister l'ensemble des sous-contextes utilisés dans des domaines proches (Tableau 5).

Sous-contexte	Définition	Domaines d'application
Sous-contexte utilisateur [139]–[143], [171]	Ensemble des informations concernant le profil de l'utilisateur du logiciel (exemple : niveau d'expertise)	Applications en usine Applications sur téléphone Recherche d'informations Modèle général Pédagogie
Sous-contexte spatio-temporel [139]–[141], [143]	Ensemble des informations sur les positions et déplacements de l'utilisateur (exemple : positions GPS)	Applications sur téléphone Recherche d'informations Modèle général Pédagogie
Sous-contexte d'activité [139]–[141], [143], [171]	Ensemble des informations relatives à l'activité de l'utilisateur (exemple : objectifs de travail et états de progression)	Applications en usine Applications sur téléphone Recherche d'informations Modèle général Pédagogie

Sous-contexte social [142], [143], [171]	Ensemble des informations relatives aux interactions sociales de l'utilisateur (exemple : liste de contacts)	Applications en usine Applications sur téléphone Recherche d'informations
Sous-contexte de documentation [141], [142]	Ensemble des informations concernant la documentation consultée par l'utilisateur (exemple : titre d'un document)	Recherche d'informations
Sous-contexte numérique [139], [140], [142]	Ensemble des informations relatives à l'environnement numérique avec lequel interagit l'utilisateur. (exemple : Logiciels en cours d'utilisation)	Modèle général Pédagogie Recherche d'informations
Sous-contexte environnemental [140], [143]	Ensembles des informations relatives à l'environnement physique de l'utilisateur (exemple : niveau des nuisances sonores)	Applications sur téléphone Pédagogie
Sous-contexte d'interface [141]	Ensembles des informations relatives aux périphérique numériques utilisés par l'utilisateur (exemple : Taille de l'écran utilisé)	Recherche d'informations

Tableau 5: sous-contextes existants dans des domaines proches de la conception

Dans un second temps, nous allons déterminer la pertinence des sous-contextes listés ci-dessus. Pour chaque sous-contexte, nous nous demanderons si son utilisation est pertinente au vu des trois services de CACDA (Tableau 6).

Sous-contexte	Remarques	Service 1	Service 2	Service 3
Sous-contexte utilisateur	Ce sous-contexte est présent dans tous les domaines identifiés. Les informations concernant l'utilisateur sont centrales pour les logiciels sensibles au contexte.	X	O	O
Sous-contexte spatio-temporel	Nous faisons l'hypothèse que le concepteur travail dans un cadre professionnel, dans un bureau individuel.	X	X	X

Sous-contexte d'activité	L'activité des concepteurs peut être séparé en deux catégories, les objectifs de conception définis par ses supérieurs, et l'avancement de son travail de modélisation. La capture de ces deux aspects est essentielle pour les services 2 et 3.	X	O	O
Sous-contexte social	Les interactions sociales avec les collègues de l'équipes et éventuels experts jouent un rôle essentiel dans le processus de conception.	X	O	X
Sous-contexte de documentation	Ce sous-contexte est essentiel pour les services de recherche d'information. Dans notre domaine, ce sous-contexte doit être dédié à la modélisation des règles de conception.	O	O	X
Sous-contexte numérique	La majorité de l'activité des concepteurs se déroule dans un environnement numérique et plus précisément sur une plateforme de CAO.	X	O	O
Sous-contexte environnemental	Nous faisons l'hypothèse que l'environnement physique n'impacte pas le processus de conception.	X	X	X
Sous-contexte d'interface	Nous faisons l'hypothèse que les différences d'équipement informatique n'impactent pas le processus de conception, les concepteurs ayant accès à un matériel professionnel adapté à leur travail.	X	X	X

Tableau 6: sélection des sous-contextes pertinents pour le contexte de conception
(X : non pertinent pour le service ; O : pertinent pour le service)

L'analyse du Tableau 6 permet d'identifier cinq sous-contextes potentiellement pertinents pour au moins un service de l'assistant : utilisateur, activité, social, documentation et numérique. A partir de ces sous-contextes et de nos connaissances du processus de conception, nous proposons une division du modèle de données de CACDA en quatre sous-contextes :

- Le sous-contexte sémantique est basé sur le sous-contexte de documentation et modélise les informations issues du traitement des énoncés des règles de conception
- Le sous-contexte technique reprend également des informations contextuelles rattachées au sous-contexte de documentation. Ce sous-contexte modélise les informations techniques spécifique au domaine de conception.
- Le sous-contexte social regroupe les sous-contextes utilisateur et social identifiés dans la littérature scientifique.
- Le sous-contexte numérique modélise les données contextuelles de l’environnement numérique du concepteur. Il regroupe les sous-contextes numérique et d’activité identifiés précédemment.

2.2.3 Présentation détaillée des sous-contextes

Cette partie détaille le modèle de données des quatre sous-contextes identifiés dans la partie précédente. L’union de ces sous-contextes correspond au graphe de connaissances.

2.2.3.1 Sous-contexte sémantique

Comme évoqué plus tôt, le sous-contexte sémantique modélise les informations sémantiques, principalement issues des énoncés des règles de conception. Considérons la règle suivante : *“It is necessary to have between wall corners a radius higher than the milling cutter radius”*. L’étape la plus élémentaire pour représenter cette règle sous forme de graphe est de relier le nœud la représentant à l’ensemble des mots-clés présents dans son énoncé comme montré par la Figure 22. Les mots-clés ou *“Keywords”* en anglais, correspondent aux noms, verbes, adverbess et adjectifs identifiés comme tel dans l’énoncé par un outil de traitement du langage naturel. Afin de ne pas tenir compte de l’accord des mots dans l’énoncé, ceux-ci sont ramenés à leur base lexicale (lemme) par un processus appelé lemmatisation.

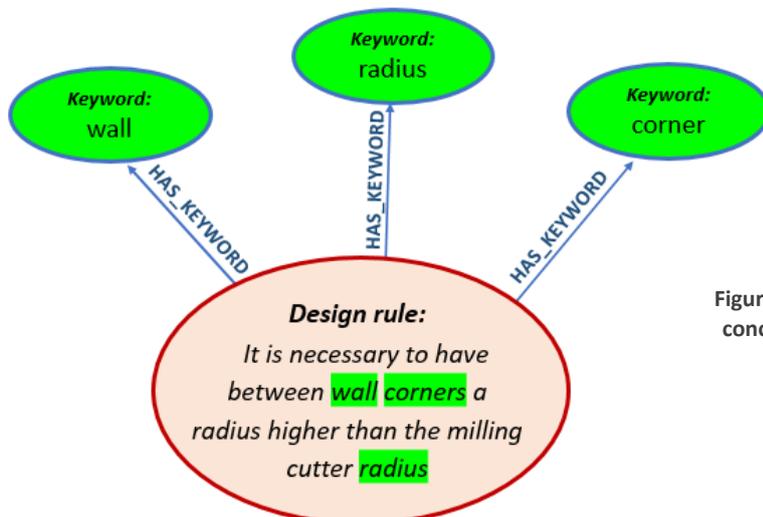


Figure 22: Nœud représentant une règle de conception reliée à trois de ses mots-clés

Cette représentation permet d'identifier les règles de conception à partir des mots présents dans leur énoncé. Cependant, cette recherche par mots-clés est limitée. Pour retrouver une règle, il faut rechercher les mots exacts ou des formes dérivées (forme conjuguée, plurielle, etc.). Or, le concepteur n'a probablement qu'une vague idée des règles dont il a besoin. Il est donc nécessaire d'étendre les requêtes afin de prendre en compte le sens des énoncés pour des recommandations plus performantes. Dans l'état de l'arts, plusieurs chercheurs proposent des méthodes spécifiques pour la recommandation de textes courts [172], [173]. Une approche classique et l'enrichissement sémantique de graphe à l'aide de sources extérieures.

Pour chaque mot-clé identifié, nous rajoutons donc au graphe les éléments sémantiques qui lui sont proches comme la définition de ce mot, ainsi que ses synonymes¹², hyperonymes¹³ et hyponymes¹⁴ et autres termes dérivés comme des concepts généraux. Ces termes peuvent être extraits de bases de données sémantiques accessibles en ligne. Une attention particulière doit cependant être apportée lors de la sélection de ces éléments afin qu'ils correspondent le plus possible à un contexte industriel. Le processus technique de cet enrichissement est détaillé dans la partie 3.2.1. La Figure 23 présente les résultats dans le graphe de l'enrichissement sémantique du mot-clé "radius".

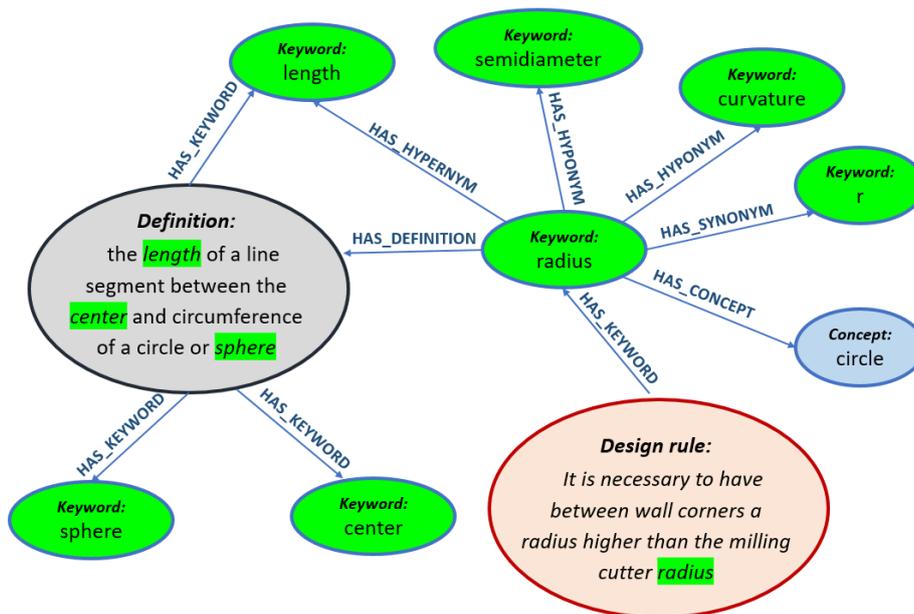


Figure 23 : Enrichissement sémantique du mot-clé "radius"

L'enrichissement sémantique permet ainsi la création de liens indirects entre plusieurs mots, permettant une meilleure analyse des diverses significations et usages d'un mot. Ces liens indirects permettent également à l'assistant de proposer au concepteur des mots-clés proches de ceux de sa requête (Figure 24). Cette exploration de proche en proche peut permettre au concepteur de découvrir des règles voisines et donc potentiellement

¹² Mot ayant un sens identique ou très voisin.

¹³ Mot dont le sens inclut celui d'autres mots plus spécifiques.

¹⁴ Mot dont le sens est inclus dans celui d'autres mots plus génériques.

applicables. La sélection de filtres sémantiques par le concepteur lui permet de préciser son besoin.

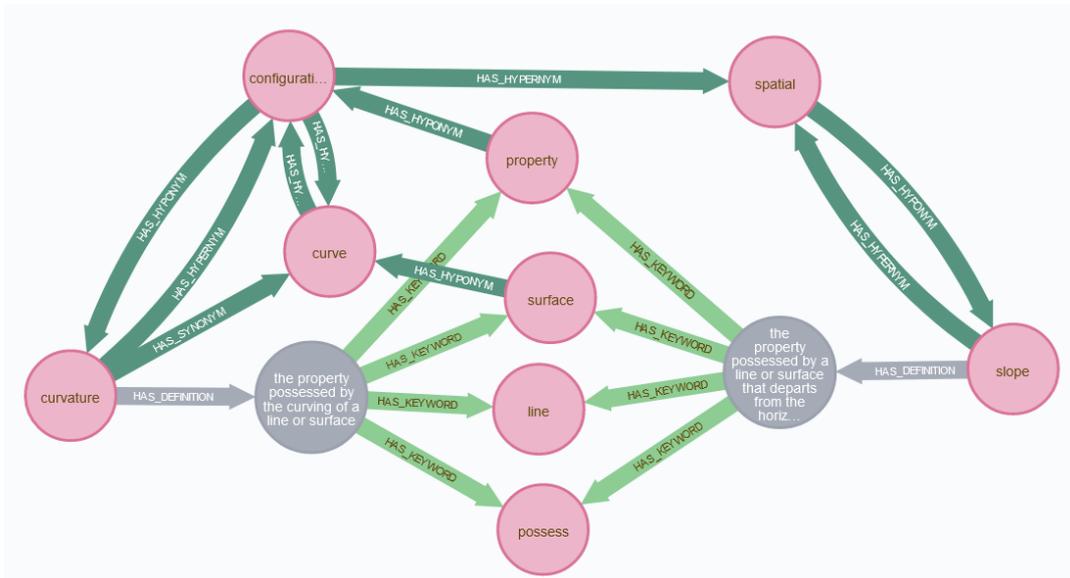


Figure 24 : Exemple de lien indirect entre les mots-clés “curvature” (courbure) et “slope” (pente)

Ainsi, la structure du sous-contexte sémantique est déterminée par la nécessité pour l’assistant de recommander des règles de conception à partir de leur énoncé en langage naturel. La Figure 25 représente le méta-modèle de ce sous-contexte. Les nœuds modélisés dans ce sous-contexte ainsi que le détail de leurs attributs sont définis dans le Tableau 7.

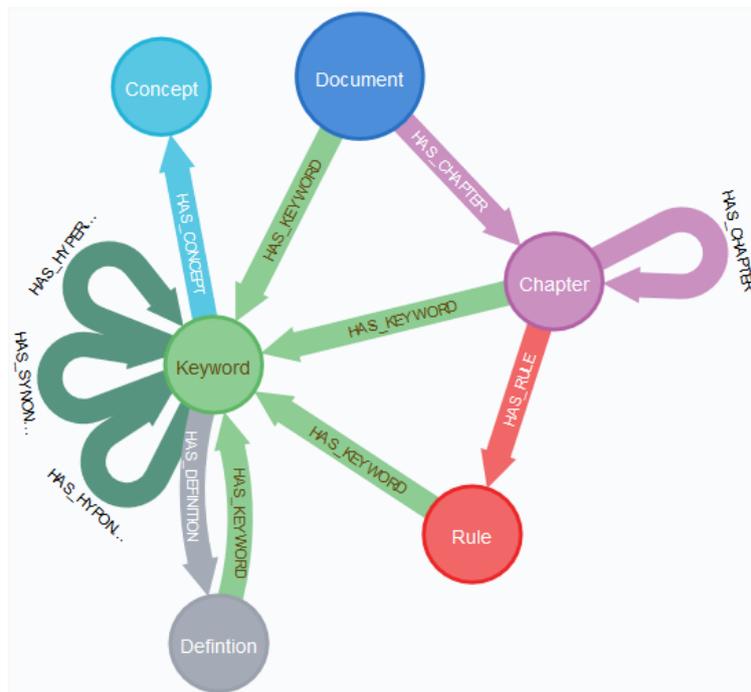


Figure 25 : Sous-contexte sémantique du graphe de connaissances

Concept	Concept général issu de Conceptnet
	<Concept:String>: Nom du concept
Document	Tout document semi-structuré ou non structuré contenant des règles de conception
	<Title:String>: Titre du document (exemple: "Design for metallic parts") <Update:Date>: Date de la dernière modification du document
Chapter	Élément de structure des manuels de règles de conception
	<Title:String>: Titre du chapitre <Page:Integer>: Numéro de page du chapitre dans le document source <Chapter_num:String>: Numéro du chapitre dans la structure du document source (exemple: "Chapter 1.2") <Source_id:UUID>: Identifiant du document source du chapitre
Rule	Règle de conception
	<Main_Statement:String>: Énoncé principal de la règle en langage naturel <Schema:String>: La règle de conception peut être associée avec un schéma descriptif ou une image. La chaîne de caractères stockée dans cet attribut pointe vers le schéma associé à la règle dans les ressources de l'assistant. <Formula:String>: La règle de conception peut être associée avec une formule mathématique (exemple: "R = (milling cutter radius) + 1 mm") <Last modification:date>: Date à laquelle la règle de conception a été modifiée pour la dernière fois.
Keyword	Mot-clé issu de l'énoncé d'une règle, d'un document source ou d'un enrichissement sémantique
	<Lemma:String>: Base lexicale du mot-clé (lemme) <Stem:String>: Racine sémantique du mot-clé <Tag:String>: Rôle grammatical du mot-clé
Definition	Définition d'un mot-clé, issu de Wordnet ou d'un glossaire métier
	<Statement:String>: Énoncé de la définition en langage naturel. <Score:Float>: Score de similarité de la définition. Ce score représente la pertinence de la définition par rapport au reste du sous-contexte sémantique. Le détail de son calcul est donné dans la partie 3.2.1.

Tableau 7: Nœuds du sous-contexte sémantique

2.2.3.2 Sous-contexte technique

Le sous-contexte sémantique permet la recommandation de règles en fonction de leur signification en langage courant. Cependant, la conception de produits ne se limite pas au langage courant, mais fait appel à du vocabulaire technique qui n'est pas structuré dans les bases de connaissances générales. C'est pourquoi le graphe doit être enrichi d'un sous-contexte technique. Les nœuds de ce sous-contexte représentent du vocabulaire technique tel que des noms de matériaux, de procédés de fabrication et d'outils. L'identification de mots clés techniques dans les énoncés des règles permet de relier celles-ci à ce sous-contexte (Figure 26). Ces mots-clés peuvent être identifiés à partir de dictionnaires techniques alimentés par des glossaires, taxonomies et listes de matériaux d'entreprise. Ces données peuvent également être utilisées pour entraîner un algorithme d'apprentissage machine capable de catégoriser des règles selon leur appartenance ou non au sous-contexte technique [174].

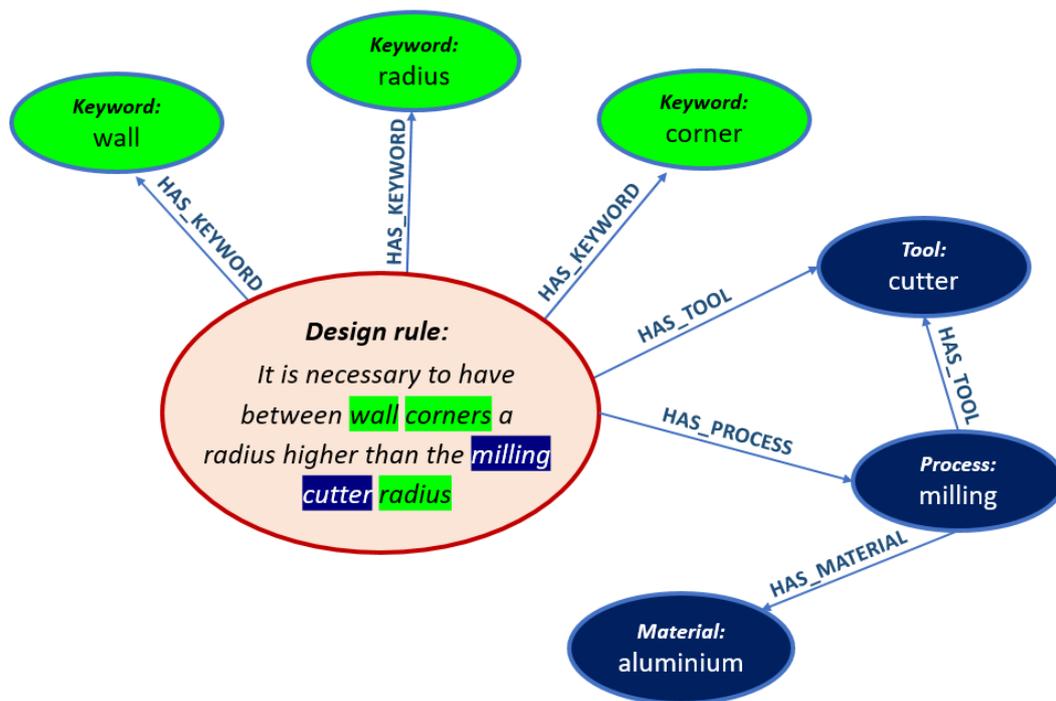


Figure 26 : Exemple de règle reliée au sous-contexte technique et sémantique

Le sous-contexte technique est donc constitué d'un ensemble de mots clés identifiés comme relevant du domaine technique et reliés entre eux de façon cohérente. La liste des nœuds impliqués dans ce sous-contexte est détaillée dans le Tableau 8. La Figure 27 montre quant à elle le méta-modèle du sous-contexte technique.

On peut noter que ce sous-contexte est le plus dépendant du domaine industriel considéré. Il peut ainsi être détaillé, étendu et complété par une entreprise pour améliorer les recommandations de règles, ou permettre de relier des règles ou des pièces aux limites techniques spécifique d'une usine ou d'un atelier. Ce travail de modélisation pourrait permettre d'accompagner un concepteur vers des pièces optimisées pour les capacités d'une usine par exemple.

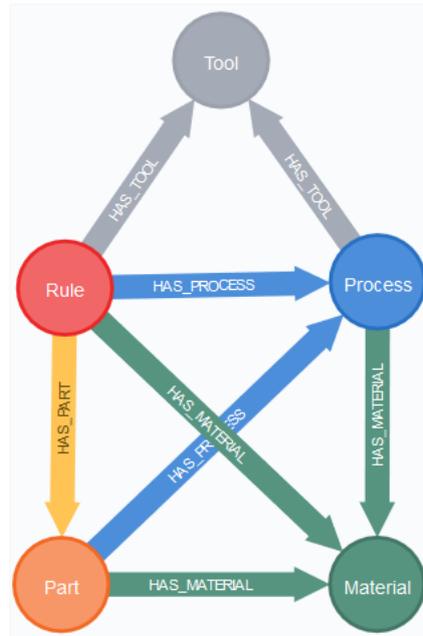


Figure 27 : Sous-contexte technique du graphe de connaissances

Tool	Outil utilisé dans certains procédés de fabrication (exemple : une fraise en usinage) <Name:String>: Nom de l'outil <Dimensions:String>: Chaîne de caractères décrivant les dimensions de l'outil. <Tool_type:String>: Chaîne de caractères décrivant le type d'outil
Part	Pièce d'un produit industriel (exemple : les ailes d'un avion) <Name:String>: Nom de la pièce <Description:String>: Description de la pièce.
Process	Procédé de fabrication que l'entreprise peut utiliser pour produire leurs pièces (exemple : fraisage) <Name:String>: Nom du procédé <Documentation:String>: Lien vers la documentation technique décrivant le procédé
Rule	Design rules C.f. Table 3
Material	Matériau utilisée par l'entreprise pour la fabrication de leurs produits (exemple : Titane) <Name:String>: Nom du matériau (exemple : aluminium)

<Type:String>: Type de matériau (exemple : métal)
 <Characteristics:String>: Caractéristiques mécaniques du matériau

Tableau 8 : Nœuds du sous-contexte technique

2.2.3.3 Sous-contexte social

Comme évoqué dans l'état de l'art et dans l'identification des sous-contextes, les interactions sociales jouent un rôle majeur dans de nombreux systèmes de recommandation. Le sous-contexte social est d'ailleurs présent dans l'ensemble des modèles contextuels revus dans l'état de l'art. L'aspect social est également un élément important en conception de produit. Ce sous-contexte permet d'effectuer des recommandations basées sur les activités et affinités des utilisateurs.

Dans le processus de conception, le sous-contexte social modélise l'environnement socio-professionnel du concepteur. Ces informations sont utilisées par l'assistant pour recommander des règles avec lesquels des collègues ont interagis. Par exemple, si une règle est fréquemment sélectionnée par un collègue ayant un profil très similaire au concepteur, il est probable que cette règle puisse l'intéresser. Idem pour des recherches par mots-clés. Notre assistant doit prioriser la recommandation de ces informations (Figure 28).

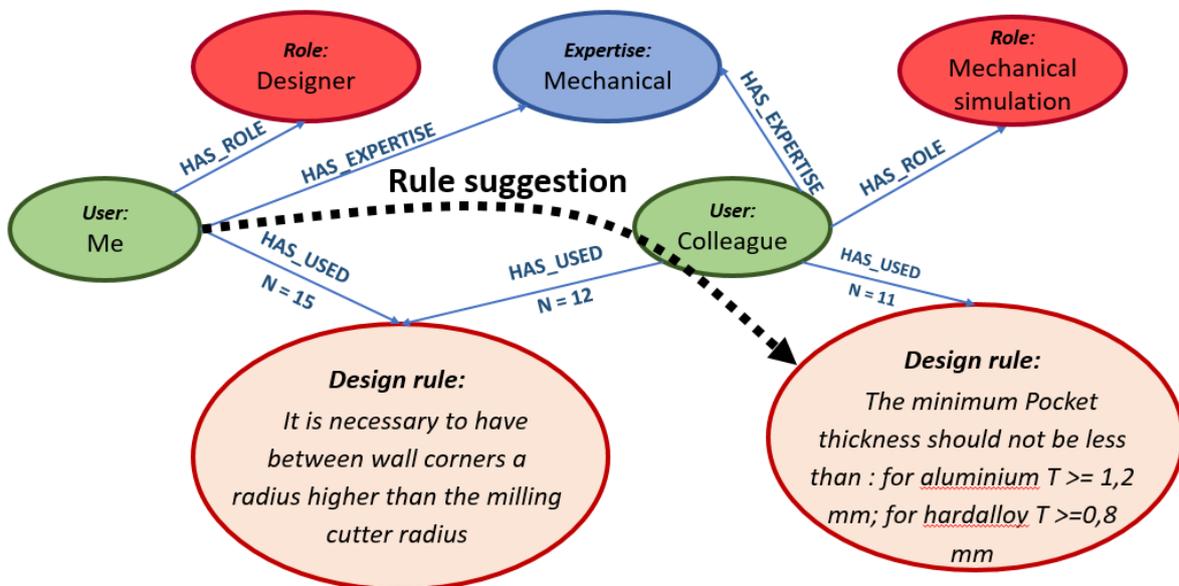


Figure 28 : Exemple de relation indirecte entre deux règles de conception

Le sous-contexte social comporte à la fois des éléments qui sont spécifiques au domaine et donc relativement stables à travers le temps et des éléments dépendant de l'activité de l'utilisateur. Le profil d'un utilisateur incluant ses domaines d'expertise, son rôle, ses sujets

d'intérêt et son département évoluent peu à court terme et peuvent être facilement mis à jour en cas de changement d'effectifs. La liste des contacts professionnels fréquents d'une personne dans une entreprise (envois de mails, réseau social d'entreprise, etc.) peut aussi être prise en compte par l'assistant et est représentée par la relation "FRIEND_OF" dans notre modèle. A contrario, les mots-clés recherchés par un concepteur, les règles consultées et utilisées sont des informations dynamiques, lesquelles sont mises à jour au fur et à mesure de l'activité de l'utilisateur. Le méta-modèle du sous-contexte social est présenté dans la Figure 29. Le Tableau 9 liste et définit les attributs des nœuds de ce sous-contexte.

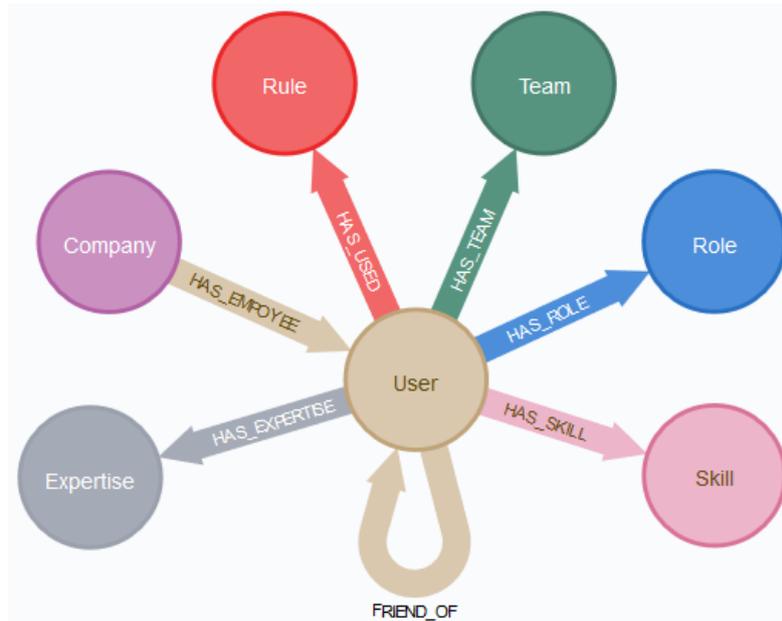


Figure 29 : Sous-contexte social du graphe de connaissances

User	Utilisateur de l'assistant
<Name:String>: Nom de l'utilisateur	
<Seniority:Integer>: Ancienneté de l'utilisateur en nombre d'années	
<Mail:String>: Adresse mail professionnelle de l'utilisateur	
Team	Groupe d'utilisateurs travaillant dans une équipe
<Name:String>: Nom de l'équipe	
<Team_goal:String>: Fonction ou objectif de l'équipe (exemple : conception du fuselage)	
Company	Entreprise
<Name:String>: Nom de l'entreprise	
<Activity:String>: Domaine d'activité de l'entreprise (exemple : industrie aéronautique)	
Role	Rôle de l'employé au sein de l'entreprise (exemple : concepteur surfacique)
<Name:String>: Nom du rôle	
<Description:String>: Description du rôle (exemple : "Conception des surface de classe A pour les ailes d'avion")	

Skill	Compétence (exemple : Conception surfacique en CAO)
<i><Name:String>: Nom de la compétence</i>	
<i><Description:String>: Description de la compétence (exemple : “Conception technique de surface de classe A5 avec un outil CAO spécialisé”)</i>	
Expertise	Sujet ou domaine d’expertise d’un utilisateur
<i><Name:String>: Nom de l’expertise</i>	
<i><Description:String>: Description de l’expertise</i>	

Tableau 9 : Nœuds du sous-contexte social

2.2.3.4 Sous-contexte numérique

De nombreuses règles de conception concernent directement le modèle numérique de la pièce conçue. Les informations contextuelles extraites de l’environnement CAO peuvent être utilisées pour influencer sur les recommandations de l’assistant. Par exemple, si un concepteur a sélectionné un congé et réalise une recherche, l’assistant doit détecter cette activité favoriser les règles en lien avec le concept de congé dans la recommandation. Certains événements comme l’utilisation de certains outils de modélisation, peuvent être les déclencheurs de recommandations autonomes. La modélisation dynamique de l’activité numérique du concepteur compose le sous-contexte numérique. Ce sous-contexte capture les logiciels utilisés (exemple : CATIA), le module en cours d’utilisation (exemple : Part Design), l’opérateur sélectionné (exemple : Extrusion) ainsi que le nom de la pièce en cours de conception et les informations qui lui sont associées dans l’environnement PLM de l’entreprise. La relation “LINK_TO” représente ce lien entre deux entités dans le système PLM (exemple: lien entre les dessins d’exploration d’une pièce, son modèle 3D et sa géométrie en format STL).

Afin de recommander des règles de conception en fonction de ces informations, le sous-contexte numérique est relié au reste du graphe par un ensemble de mots clés et autres informations contextuelles spécifiques au domaine (Figure 30). Bien évidemment, le chemin entre le sous-contexte numérique et une règle de conception peut être plus complexe en fonction de la situation.

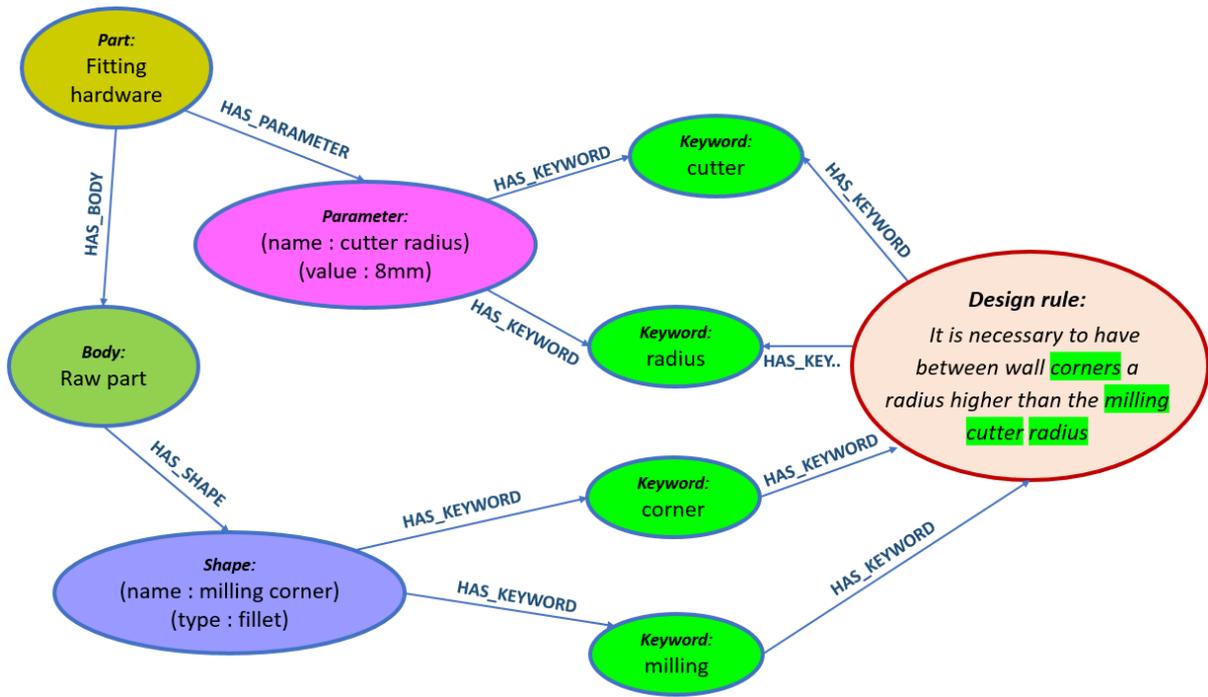


Figure 30 : Chemins reliant le sous-contexte numérique à une règle de conception

Le sous-contexte numérique est largement centré sur la modélisation de l'activité du concepteur dans un environnement de CAO. La structure de ce sous-contexte présentée dans la Figure 31, permet de représenter et d'interpréter le schéma de construction d'un modèle CAO. Le Tableau 10 détaille l'ensemble des nœuds présents dans ce sous-contexte.

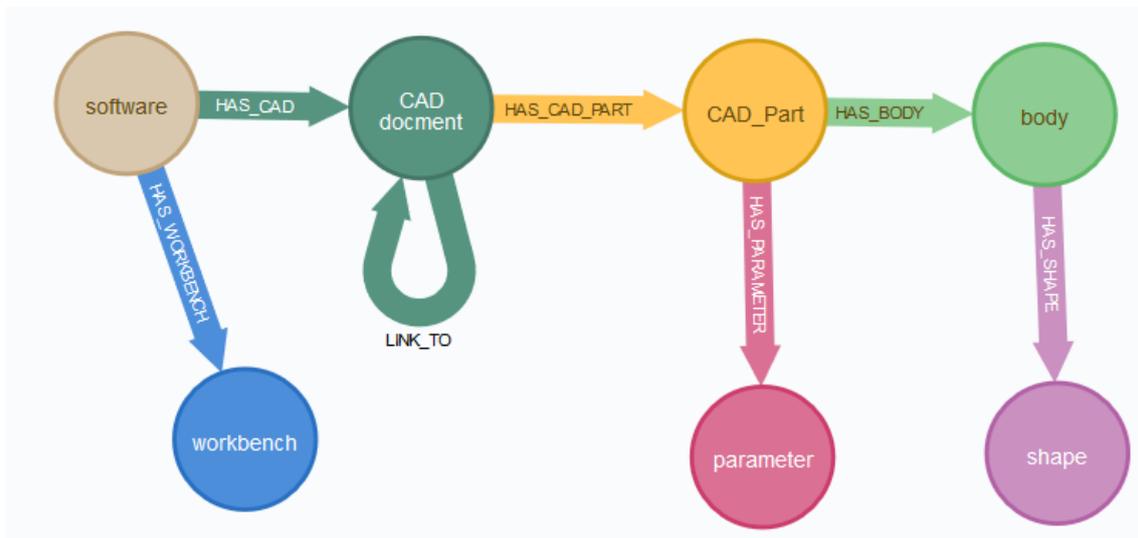


Figure 31 : Sous-contexte numérique du graphe de connaissances

Software	Environnement CAO utilisé par le concepteur (exemple : CATIA)
<i><Name:String>: Nom du logiciel</i>	
<i><Functionality:String>: Description du logiciel (exemple : outil de CAO généraliste)</i>	
CAD document	Document contenant un modèle numérique
<i><Name:String>: Nom du document</i>	
<i><Last_modification:Date>: Date de la dernière modification du document.</i>	
CAD Part	Modèle CAO d'une pièce
<i><Name:String>: Nom de la pièce</i>	
<i><Characteristics:List>: Caractéristiques techniques de la pièce (exemple : Volume, Masse, etc.)</i>	
<i>< Last_modification:Date>: Date de la dernière modification de la pièce</i>	
Body	Corps : Élément CAO contenant des données géométrique
<i><Name:String>: Nom du corps</i>	
<i>< Last_modification:Date>: Date de la dernière modification du corps</i>	
Shape	Forme : Élément géométrique
<i><Name:String>: Nom de la forme</i>	
<i><Type:String>: Type de forme</i>	
<i><Feature:String>: Opération de modélisation dont est issue la forme</i>	
Parameter	Paramètre : Variable dont la valeur a un impact sur la géométrie du modèle
<i><Name:String>: Nom du paramètre</i>	
<i><Value:Numerical>: Valeur numérique du paramètre</i>	
Workbench	Atelier CAO : Atelier d'un logiciel CAO (exemple : Part Design dans le logiciel CATIA)
<i><Name:String>: Nom de l'atelier</i>	
<i><List_of_tools:String>: Liste des outils de modélisation accessibles dans l'atelier CAO</i>	

Tableau 10 : Nœuds du sous-contexte numérique

2.2.3.5 Consolidation des sous-contextes

L'exploration des sous-contextes permet de recommander des règles de conception en fonction d'un matériau, d'un procédé de fabrication ou d'une pièce spécifique référencée dans le graphe de connaissances. Cependant, l'exploration d'un seul sous-contexte ne permet pas de prendre en compte la situation du concepteur dans sa globalité et limite ses fonctionnalités. Notre assistant intelligent doit être capable de répondre à des questions du type : "Quel collègue est expert du domaine de conception dans lequel s'inscrit la pièce sur laquelle je travaille ?". Répondre à cette question nécessite l'exploration du sous-contexte

technique et social. Ces deux sous-contextes doivent donc être reliés de façon cohérente dans le graphe de connaissances. Dans l'exemple représenté par la Figure 32, on crée la relation [INCLUDES], pouvant relier certaines expertises à des pièces techniques. Cette relation permet de répondre à la question posée et constitue une passerelle pour l'exploration simultanée des deux sous-contextes par un algorithme de recommandation.

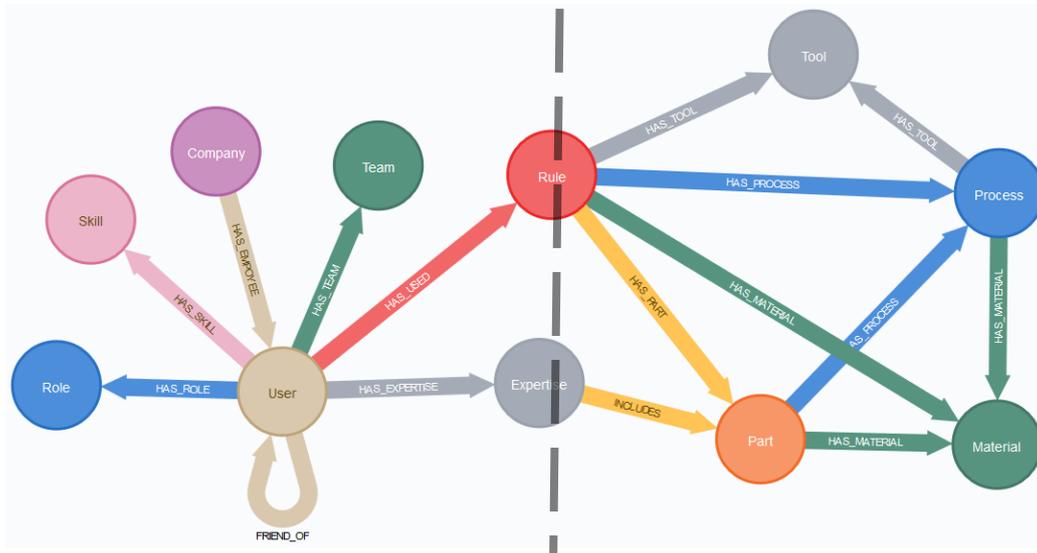


Figure 32 : Exemple de consolidation du graphe de connaissances

Ces consolidations peuvent se créer entre tous les sous-contextes selon les besoins spécifiques d'une entreprise. Elles permettent à des algorithmes d'exploration du graphe de connaissances de prendre en compte l'ensemble du contexte de l'utilisateur lors de recommandations.

2.3 Synthèse

Ce chapitre est consacré à la description théorique de CACDA. Cet environnement a pour but de proposer une nouvelle approche pour la maîtrise des règles de conception : une approche sensible au contexte de conception et centrée sur le concepteur. Ce chapitre débute par une analyse fonctionnelle de l'assistant. Cette analyse sert ensuite de base pour la construction d'un modèle de données adapté aux services attendus. Cette description théorique de l'assistant permet de valider la première étape du carré de validation.

2.3.1 Description fonctionnelle de l'environnement de conception intelligent

Dans un premier temps, nous avons défini les fonctionnalités attendues de l'environnement de conception intelligent. Son objectif principal est d'accompagner les

concepteurs dans leur utilisation des règles de conception. Nous avons structuré cette fonction principale en trois services (Figure 33) :

- Le premier service consiste à capturer les informations issues des règles et du contexte de conception dans un graphe de connaissances.
- Le second service consiste à présenter au concepteur les règles de conception qui sont adaptées à son besoin pour lui permettre de progresser dans sa modélisation.
- Le troisième service consiste à accompagner le concepteur dans son utilisation des règles de conception. Le concepteur doit avoir accès aux informations lui permettant de comprendre et d'appliquer les règles de conception ou de justifier des choix de conception en contradiction avec certaines règles.

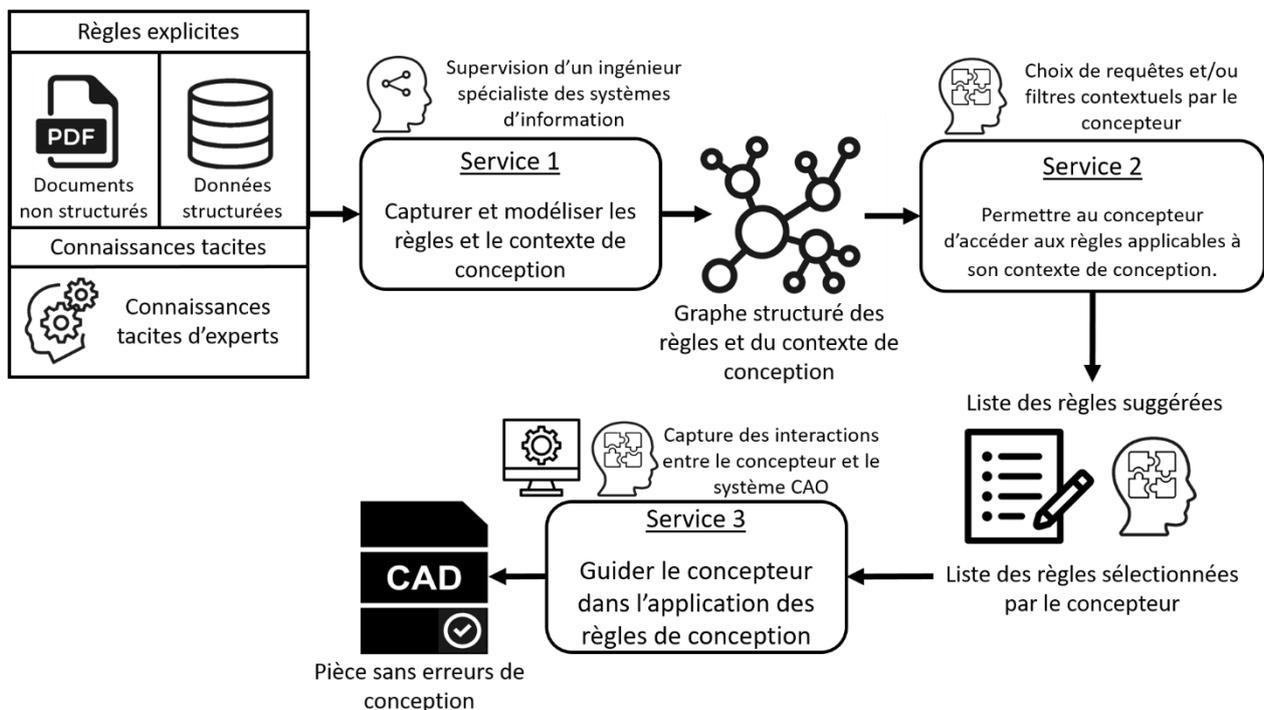


Figure 33: Schéma fonctionnel de CACDA

2.3.2 Proposition d'un modèle de données orienté graphe

Dans cette partie, à partir de l'analyse fonctionnelle de notre environnement de conception intelligent, nous avons proposé un modèle de données orienté graphe, adapté à la représentation des règles de conception et du contexte du concepteur. Ce modèle est générique dans le sens où il peut s'adapter à tous les domaines de conception industriel à l'aide d'un logiciel CAO.

Afin de construire notre modèle, nous nous sommes appuyé sur deux méthodes :

- La première méthode est purement fonctionnelle et centrée sur les besoins du concepteur. Elle permet de modéliser dans le graphe de connaissances les relations nécessaires pour réaliser des services attendus de l'environnement de conception intelligent. Cette méthode peut notamment permettre d'adapter le modèle de données à un domaine de conception précis, mais ne permet pas de définir tout le modèle car il est impossible de liste de façon exhaustive l'ensemble des questions auxquelles l'assistant est susceptible de répondre.
- La seconde méthode est structurelle et nous permet de définir une structure de référence adaptée à nos exigences fonctionnelles. En s'appuyant sur une analyse de modèles proposés pour des services similaires dans l'état de l'art et sur notre connaissance, nous proposons une structure générale à même de relier les règles de conception aux informations contextuelles du concepteur.

Le modèle de données proposé est divisé en quatre sous-contextes, représentant chacun une partie du contexte de conception :

- Le sous-contexte sémantique, présenté dans la partie 2.2.3.1, regroupe les informations extraites des documents en langage naturel de l'entreprise et notamment des manuels de conception. Il permet de structurer les règles de conception dans notre graphe de connaissances.
- Le sous-contexte technique, présenté dans la partie 2.2.3.2, modélise les informations spécifiques au domaine technique de la conception. On y retrouve la description des produits réalisés par l'entreprise, les procédés de fabrication et les matériaux utilisés.
- Le sous-contexte social, présenté dans la partie 2.2.3.3, représente l'environnement socio-professionnel du concepteur et permet de prendre en compte l'historique et le rôle du concepteur lors de la recommandation de règles, mais aussi ceux de ses collègues travaillant sur des sujets similaires.
- Le sous-contexte numérique, présenté dans la partie 2.2.3.4, modélise les informations contextuelles issues de l'activité du concepteur sur ordinateur et plus particulièrement sur le logiciel CAO utilisé. Ce sous-contexte est le seul qui évolue au fur et à mesure de la progression du concepteur dans son travail. Il est donc

essentiel à la réalisation de recommandation automatique de règles de conception au fil de l'eau.

Les quatre sous-contextes sont ensuite consolidés en fonction des attentes spécifiques au domaine d'application. Le modèle final du graphe est intégré et permet une exploration simultanée de tous les sous-contextes lors de la recommandation de règles de conception.

2.4 Conclusion du chapitre

Ce chapitre apporte une description théorique complète de l'environnement de conception intelligent. Il est divisé entre une analyse fonctionnelle, applicable à l'ensemble des environnements de conception existant dans l'industrie manufacturière. Cette analyse est ensuite utilisée comme référence pour la construction d'un modèle de données orienté graphe adapté au fonctionnement de l'environnement. L'analyse fonctionnel de CACDA et la construction du modèle de données ont fait l'objet d'un article publié dans la revue *Computers in Industry* [175].

Ce chapitre permet donc de valider la première étape du carré de validation. Cette première étape suggère d'évaluer l'efficacité théorique de notre proposition par rapport aux objectifs fixés. Pour rappel, ces objectifs sont les suivants :

- L'assistant intelligent doit être en mesure de recommander à un concepteur, en temps réel, des règles applicables à son contexte de conception.
- L'utilisation de l'assistant intelligent doit permettre une meilleure maîtrise de l'ensemble des règles de conception.
- Les recommandations de règles de l'assistant intelligent doivent permettre d'améliorer l'efficacité du processus de Conception Assisté par Ordinateur.

Le schéma fonctionnel et le modèle de données de CACDA permettent de recommander à un concepteur, des règles applicables à son contexte de conception. Ces recommandations peuvent être déclenchées en temps réel par la capture des interactions entre le concepteur et l'environnement CAO. La première exigence est donc validée théoriquement.

L'assistant est capable de traiter des règles de conception en langage naturel ce qui simplifie leur compréhension par les concepteurs ainsi que leur écriture et modification. La recommandation de règles améliore l'efficacité de la recherche des règles de conception. Le suivi de l'utilisation de ces règles facilite la validation des pièces et permet d'évaluer par exemple, la détection des règles peu ou pas utilisées. CACDA améliore donc théoriquement la maîtrise des règles de conception.

La dernière exigence ne peut être validée qu'empiriquement. Il est donc nécessaire de tester CACDA avec un cas d'étude proche de son utilisation théorique. Pour cela, il est

nécessaire de réaliser un démonstrateur technique, utilisable par des concepteurs lors de la modélisation d'une pièce mécanique. C'est l'objet du prochain chapitre de ce manuscrit.

Chapitre 3 _ Implémentation d'un démonstrateur

Dans le chapitre précédent, nous avons réalisé une analyse fonctionnelle de CACDA et proposé un modèle de données adapté à son fonctionnement. Ce chapitre détaille le développement d'un démonstrateur, nécessaire à la validation empirique de notre approche (Figure 34). Ce démonstrateur est destiné à être testé dans le cadre de cas d'études industriels.

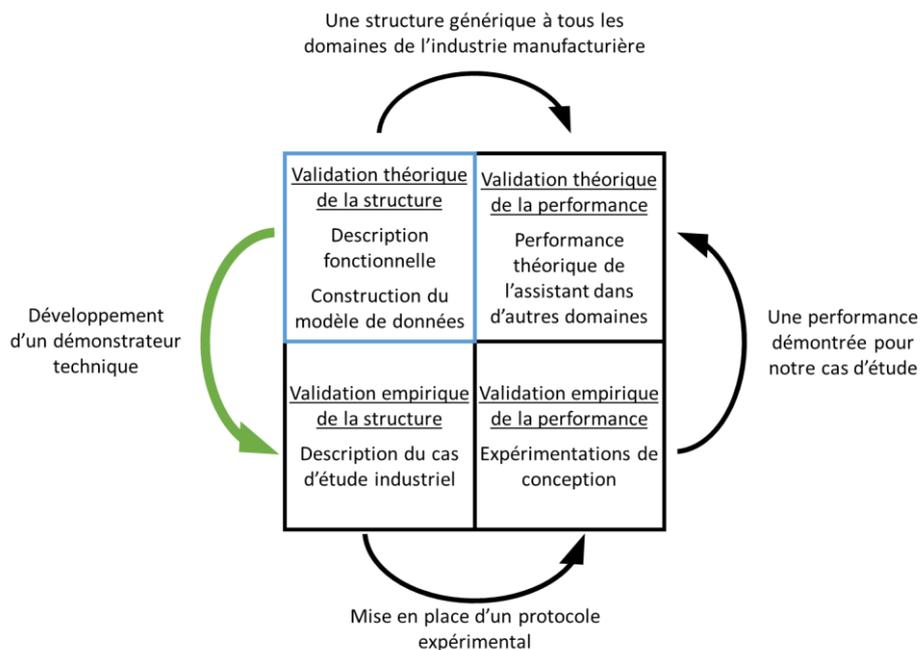


Figure 34 : Développement d'un démonstrateur technique

3.1 Structure logicielle du démonstrateur

Cette partie présente le démonstrateur de CACDA, notamment les choix de développement et l'architecture logicielle retenue. Il est à noter que ces choix sont avant tout techniques, d'autres outils ou langages de programmation pourraient être utilisés à des fins similaires.

Le démonstrateur est développé en Python¹⁵, langage bien connu et disposant d'une large communauté et de nombreuses bibliothèques. L'utilisation de ces bibliothèques spécialisées facilite le développement, en particulier pour la communication du démonstrateur avec plusieurs ressources externes, notamment des outils de traitement du langage naturel et une base de données orientée graphe. Python sert donc de langage pivot entre les différentes couches spécialisées du logiciel (Figure 35).

¹⁵ <https://www.python.org/>

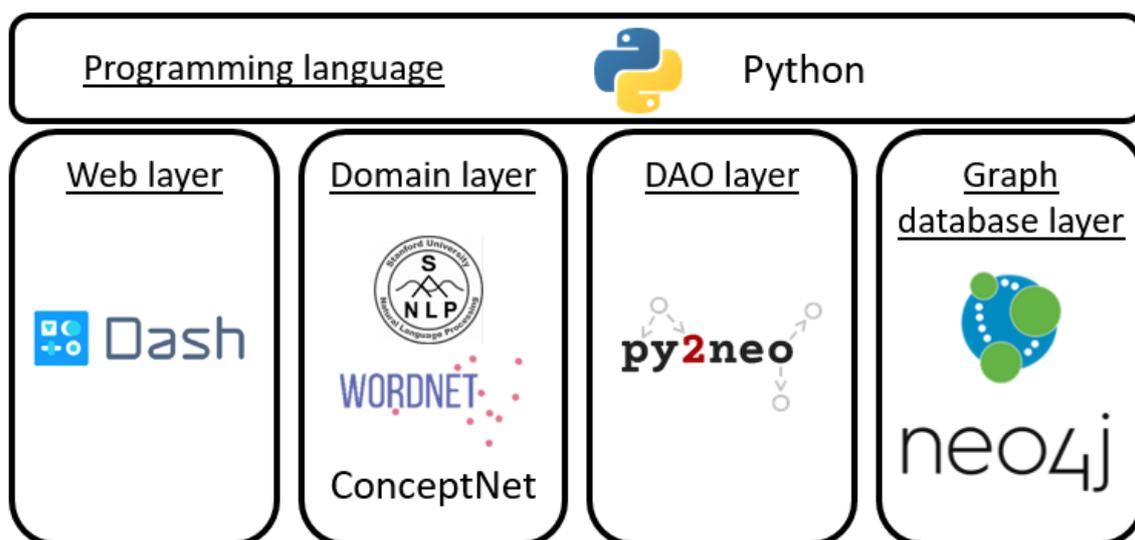


Figure 35 : Structure logicielle du démonstrateur

La première couche spécialisée est l'interface web de l'application, permettant l'interaction avec le concepteur. Elle est réalisée avec une bibliothèque Python nommée Dash¹⁶ qui fournit une infrastructure pour créer des interfaces web. L'interface du démonstrateur est présentée dans la suite de ce chapitre (Figure 43).

La deuxième couche contient les outils spécialisés nécessaires au traitement du langage naturel. Il s'agit de Stanford CoreNLP¹⁷ pour les algorithmes d'analyse, de l'ontologie ConceptNet¹⁸ et du thésaurus WordNet¹⁹ pour l'enrichissement sémantique. Ces outils sont utilisés lors de l'écriture du sous-contexte sémantique et de l'enrichissement sémantique du graphe. Ce processus est détaillé dans la partie 3.2.1.

La troisième couche est appelée DAO pour "Direct Access Object" et permet l'interaction de l'assistant avec la base de données. Nous utilisons py2neo, une API Python, pour manipuler directement les nœuds et relations de la base de données.

La dernière couche logicielle est celle de notre base de données. Nous utilisons la base de données orientée graphe NEO4J [97]. Comme mentionné dans l'état de l'art, NEO4J permet la modélisation d'un graphe de connaissances essentiel au raisonnement sur les données. Ce choix est tout d'abord justifié par la souplesse de NEO4J sur la structure des données, nous permettant d'améliorer notre modèle de données au fur et à mesure de l'avancée du développement du démonstrateur. L'outil permet également une interface simple avec des programmes externes, ce qui facilite le développement.

¹⁶ <https://dash.plotly.com/introduction>

¹⁷ <https://stanfordnlp.github.io/CoreNLP/>

¹⁸ <https://wordnet.princeton.edu/>

¹⁹ <https://conceptnet.io/>

3.2 Fonctionnalités du démonstrateur

Lors de l'analyse fonctionnelle de CACDA, nous avons identifié 3 services permettant d'améliorer la maîtrise des règles de conception. Notre démonstrateur apporte une réponse technique à chacun de ces services. Notre objectif est de réaliser un démonstrateur de CACDA afin que sa pertinence, son principe de fonctionnement et son utilisabilité puissent être testés.

3.2.1 Ecriture des sous-contextes sémantique et technique

Le premier service de l'assistant est de structurer les règles de conception et le contexte de conception dans un graphe de connaissances. Comme présenté dans l'état de l'art, plusieurs approches existent pour extraire des règles de conception de documents en langage naturel [43]. Cependant, cette technologie est encore complexe à mettre en part et ne constitue pas le cœur de notre apport. En conséquence, nous considérerons pour notre démonstrateur, que l'ensembles des règles utilisées sont stockées dans des documents semi-structurés, listant les documents sources de ces règles, les chapitres auxquels elles appartiennent ainsi que leurs énoncés principaux (Tableau 11).

Numéro de règle	Enoncé principal	Document source	Numéro de chapitre
1	<i>All milling element should be modeled with respect to cutter diameter. When possible, always select a standard dimension for milling cutters to minimize cost.</i>	Design Rules for Metallic Parts	4.2.2
2	<i>The maximum cutting height of a milling cutter determines the maximum depth of a pocket that can be machined. This value depends on the cutter diameter</i>	Design Rules for Metallic Parts	4.2.2
3	<i>It is necessary to have between wall corners a radius higher than the milling cutter radius</i>	Design Rules for Metallic Parts	4.2.3

Tableau 11 : Extrait du document source semi-structuré

Avec ces données d'entrée, le processus de création du graphe se déroule en 4 étapes (Figure 36) :

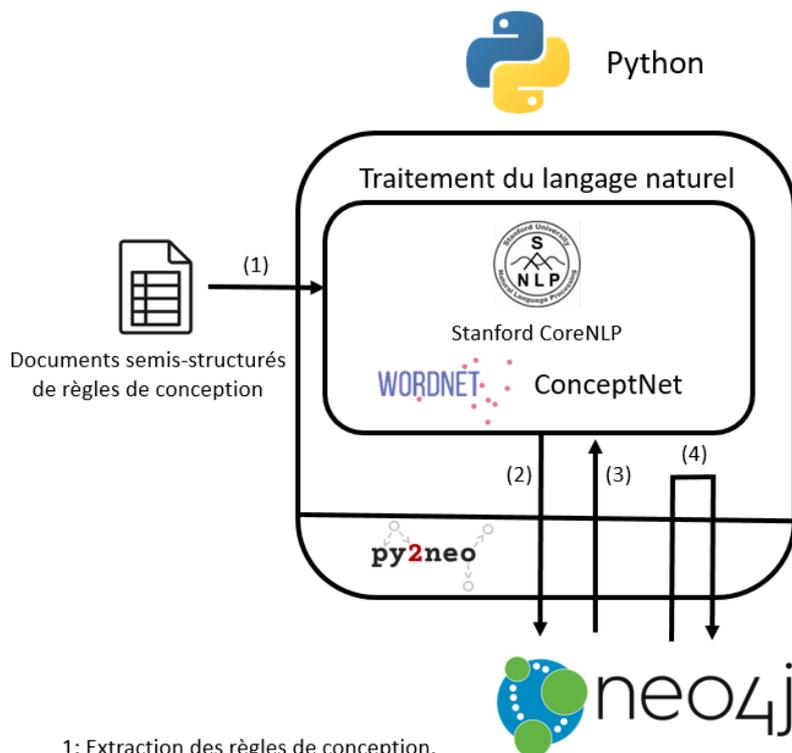
Etape 1 : L'ensemble des règles de conception sont extraites des documents semi-structurés. Le démonstrateur peut ainsi créer les nœuds qui correspondent aux règles, documents et chapitres. Les énoncés des règles sont récupérés afin d'en réaliser l'analyse.

Etape 2 : Les mots-clés issus de l'énoncé principal des règles de conception sont extraits et rajoutés au graphe. Ils passent ensuite par un processus de désambiguïsation et d'enrichissement sémantique. Ces procédés permettent d'ajouter des éléments sémantiques proches du mot d'origine (synonymes, concepts, etc.) afin de faciliter la recherche des règles. Les détails techniques de ces procédés ainsi qu'un exemple représentatif sont donnés ci-

dessous. Les nœuds contenant du texte (documents, chapitres, définitions etc.), à l'exception des règles, sont rattachés aux mots-clés contenus dans leurs énoncés.

Etape 3 : Une liste de mots-clés, représentatifs de notre domaine d'étude, est extraite du graphe de connaissances pour servir de référence au processus de désambiguïsation. Cette étape, où l'assistant récupère des données dans le graphe est simultanée avec l'étape 2.

Etape 4 : Les éléments techniques sont ensuite identifiés dans le graphe à partir d'un dictionnaire de termes techniques. L'assistant leur associe alors les labels appropriés et les relie entre eux pour former le sous-contexte technique.



- 1: Extraction des règles de conception.
- 2: Ecriture du sous-contexte sémantique dans le graph des connaissances.
- 3: Récupération de références sémantiques pour la désambiguïsation.
- 4: Identification des éléments techniques pour construire le sous-contexte technique.

Figure 36 : Architecture logicielle pour l'écriture du graphe de connaissances

Afin de détailler les procédés de désambiguïsation et d'enrichissement sémantique évoqués plus tôt, considérons la règle suivante :

It is necessary to have between wall corners a radius a bit higher than the milling cutter radius to avoid an engagement of the tool in the part corner

Lors de la première étape, le démonstrateur lit la règle dans le document semi-structuré. Les outils de traitement du langage naturel de Stanford CoreNLP permettent au démonstrateur d'isoler les mots-clés (i.e. noms, verbes, adjectifs et adverbes) de la règle et de les réduire à leur base lexicale, appelée lemme. Ces lemmes sont ajoutés au graphe et reliés à la règle (Figure 37).

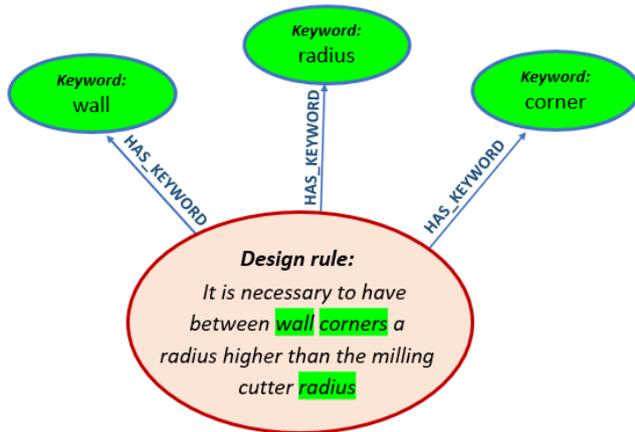


Figure 37: Nœud représentant une règle de conception reliée à trois de ses mots-clés

Considérons le mot-clé *radius*. En consultant le thésaurus WordNet, le démonstrateur extrait l'ensemble des significations possibles de ce mot (appelés synsets dans WordNet) et en déduit une liste de mots représentatifs issus des éléments sémantiques proches dans WordNet (Tableau 12).

Définition	Liste de mots représentatifs
The length of a line segment between the center and circumference of a circle or sphere.	[length, line, segment, center, circumference, circle, sphere, r, curvature, semidiameter, diameter]
A circular region whose area is indicated by the length of its radius.	[circular, region, area, indicate, length, part, location]
The outer and slightly shorter of the two bones of the human forearm.	[outer, short, bone, human, forearm, arm]

Tableau 12 : Exemple de trois significations du mot-clé radius

Le processus de désambiguïsation consiste à choisir le bon sens de *radius*. L'assistant va comparer les listes représentatives des synsets avec une liste de référence de 400 mots issus du graphe de connaissances. Cette liste, extraite dans l'étape 2 de notre procédé, est constituée des 400 mots les plus proches de la règle dans le graphe (distance en nombre de relations). Le démonstrateur mesure alors un score de similarité basé sur le nombre de mots communs entre les deux listes comparées. Cette méthode, appelée similarité cosinus est largement utilisée pour calculer des similarités linguistiques [154], [157], [172]. Dans notre exemple, la définition la plus similaire à notre contexte est la première. Les informations correspondant à cette signification sont écrites dans le graphe (Figure 38), c'est le processus d'enrichissement sémantique.

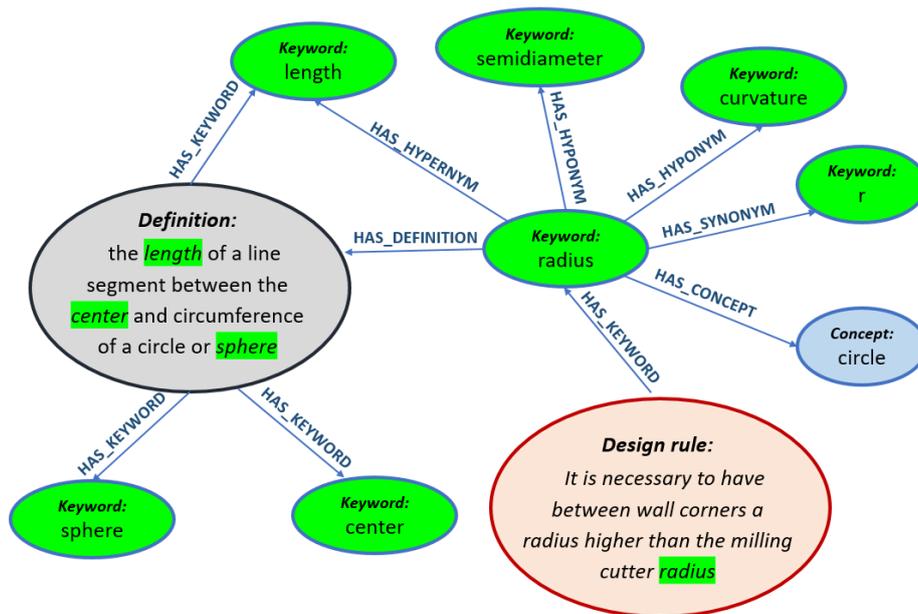


Figure 38 : enrichissement sémantique du mot-clé "radius"

L'interface du démonstrateur dispose d'une page dédiée à l'ajout de règles de conception (Figure 39). Elle permet à un utilisateur d'importer le document semi-structuré à analyser, et d'ajouter de nouvelles règles de conception en saisissant directement un énoncé.

Manage Graph

[rule retrieval](#)

Drag and Drop or [Select Files](#)

Select a user

Project 0

It is necessary to have between wall corners a radius higher than the milling cutter radius

ADD RULE

← Extraire les règles de conception d'un document semi-structuré

← Possibilité optionnelle de rattacher les règles capturées à un projet

← Entrer directement l'énoncé d'une nouvelle règle de conception

Figure 39 : Interface d'ajout de règles de conception dans le graphe

3.2.2 Recommandation des règles de conception

Le deuxième service rendu par l'assistant est de recommander des règles de conception adaptées au besoin de l'utilisateur. Pour réaliser ce service, notre démonstrateur s'appuie sur un système de recommandation piloté par une interface de recherche de règles de

conception. Cette partie présente en détail l'algorithme de recommandation utilisé puis le processus total de recherche des règles de conception.

3.2.2.1 Algorithme de recommandation

Comme présenté dans l'état de l'art (partie 1.4.3), il existe une grande variété de systèmes de recommandation. L'objectif n'est pas d'identifier le meilleur algorithme mais d'en sélectionner un qui est adapté à la recommandation contextuelle afin d'expérimenter notre approche.

L'algorithme ContextWalk [160] est basé sur un principe de marche aléatoire dans le graphe des connaissances. Son utilisation dans notre cas a plusieurs avantages :

- Comme souligné par son auteur, ce système est facilement adaptable à divers domaines d'application et modèles de données. Il est donc possible de l'adapter à la conception assistée par ordinateur tout en considérant les évolutions du modèle de données.
- L'algorithme est prévu pour de la recommandation contextuelle dans des graphes hétérogènes. Tous les sous-contextes du modèle de données sont explorés simultanément. Cela permet, d'une part, de prendre en compte l'ensemble du contexte de l'utilisateur lors des recommandations et d'autre part, d'identifier les éléments contextuels les plus pertinents afin de les utiliser comme filtres pour les prochaines recommandations.
- Le rajout de nouveaux sous-contextes est simple. Cela nous permet de conserver le même système de recommandation au cours du développement et des expérimentations successives.
- La marche aléatoire peut débuter avec un nombre de nœuds quelconque. Chaque nœud de départ peut avoir un poids différent. Ici, cela permet de sélectionner plusieurs mots-clés issus d'une requête du concepteur, mais aussi de sélectionner des éléments contextuels qui pourront influencer les recommandations.

Il est toutefois nécessaire d'adapter le système de recommandation à notre démonstrateur. Afin de construire une matrice d'adjacence cohérente, il faut lister l'ensemble des nœuds de notre graphe et de les classer par sous-contextes et labels. Cet ordre est utilisé pour construire le vecteur de position ainsi que la matrice probabiliste de transition. Ainsi, chaque nœud est associé à une dimension du vecteur de position et à une ligne de la matrice de transition. La Figure 40 présente l'ordre des sous-contextes et labels dans le vecteur de position.

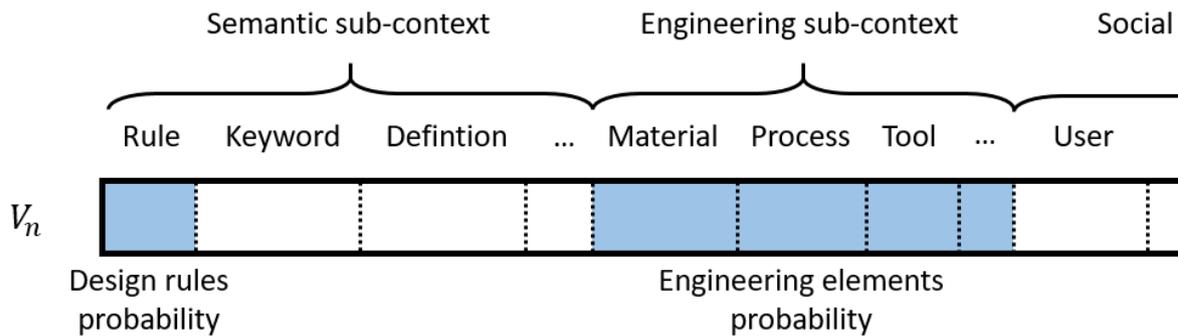


Figure 40 : Ordre des sous-contextes et labels dans le vecteur de position

Lorsqu'une recommandation est effectuée, l'assistant peut lire dans le vecteur résultat les règles dont le score est le plus élevé, mais également les éléments les plus pertinent de tout un sous-contexte, comme indiqué en bleu dans la Figure 40.

Afin de construire la matrice probabiliste de transition, nous construisons d'abord une matrice d'adjacence (A) de notre graphe de connaissances. Pour chaque nœuds i et j , $A(i, j)$ est égal à 1 si une relation relie les nœuds i et j , sinon $A(i, j)$ est égal à 0. Cette matrice est ensuite pondérée afin que la somme de chacune de ses lignes soit égale à 1. Un poids égal est donné à chacun des sous-contextes. En suivant les recommandations de Bogers, nous fixons également une probabilité d'auto-transition α égale à 0,7. Ce facteur a pour effet de ralentir la progression de la marche aléatoire dans le graphe et donc de favoriser les nœuds plus proches des points de départ.

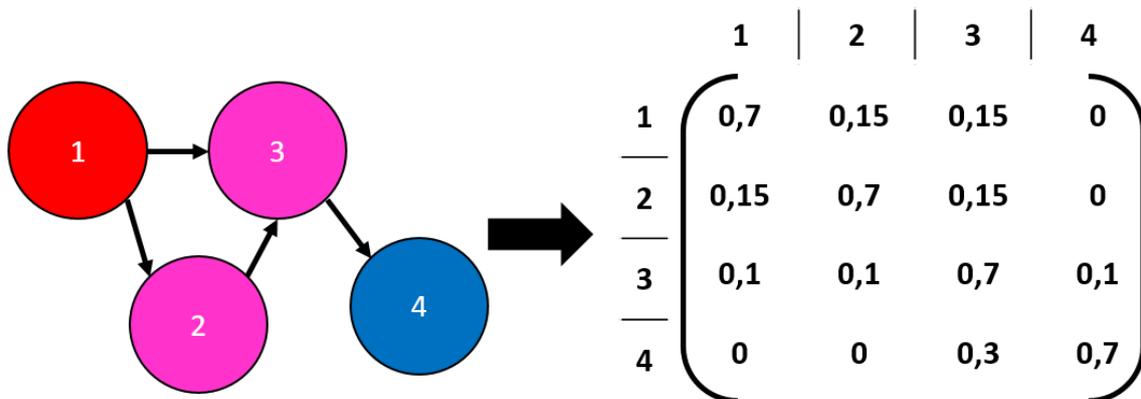


Figure 41 : Exemple de matrice probabiliste de transition

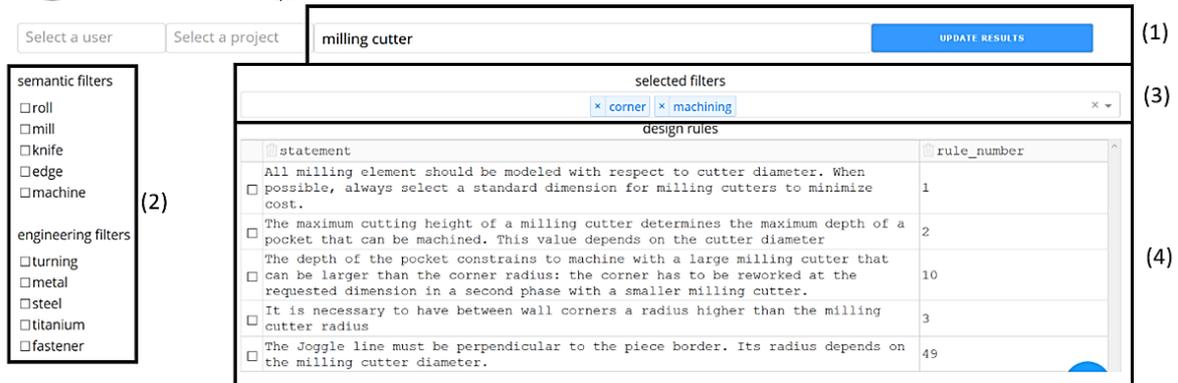
La Figure 41 présente un exemple de matrice probabiliste de transition pour un graphe de quatre nœuds. On remarque que, pour chaque nœud, la probabilité d'auto-transition, située sur la diagonale de la matrice est égale à 0,7. La somme de chaque ligne est bien égale à 1. Le nœud en rouge représente une règle, les nœuds roses des mots clés et le nœud bleu un concept technique. Supposons qu'un utilisateur sélectionne le nœud 4 pour initier une recommandation (Figure 42). Le vecteur de position initial V_0 indique donc une probabilité de position égale à 1 pour ce nœud. On remarque qu'à chaque pas dans le graphe, la somme des probabilités de position est toujours égale à 1. Chaque nœud du graphe est associé à une probabilité de position, ce qui permet à l'assistant de sélectionner les différents nœuds à recommander ou à utiliser en filtres contextuels.

	1	2	3	4
V_0	0	0	0	1
V_1	0	0	0,3	0,7
V_2	0,03	0,03	0,42	0,52
V_3	0,0675	0,0675	0,459	0,406

Figure 42 : Exemple trois pas de marche aléatoire dans un graphe de quatre nœuds

3.2.2.2 Processus de recherche de règles

Une fois l'algorithme de recommandation fonctionnel, le démonstrateur peut réaliser le deuxième service de l'assistant, recommander au concepteur des règles adaptées à son besoin.



- 1: Barre de recherche
- 2: Filtres contextuels proposés par le démonstrateur
- 3: Filtres contextuels sélectionnés par le concepteur
- 4: Liste des règles de conception recommandées

Figure 43 : Interface web pour la recherche de règles de conception

Afin d’interagir avec le concepteur et recueillir son besoin, le démonstrateur dispose d’une interface web (Figure 43). Celle-ci dispose d’une barre de recherche (1) permettant de recueillir les requêtes du concepteur. Les nœuds initiaux de la marche aléatoire sont issus des mots clés de cette requête ainsi que des filtres contextuels sélectionnés par le concepteur (3). Le bouton “Update Results”, à droite de la barre de recherche, permet de lancer une recommandation. Les règles recommandées apparaissent dans la partie centrale de l’interface et les filtres contextuels proposés dans la partie gauche sont mis à jour. Pour des raisons expérimentales, lorsque le concepteur sélectionne une règle à appliquer, le démonstrateur ouvre un fichier PDF contenant les informations de cette règle.

Le processus logiciel de recommandation de règles est présenté dans la Figure 44. Ce processus se divise en 6 étapes :

Etape 1 : Le concepteur rentre une requête et peut également sélectionner des filtres contextuels. Quand le concepteur clique sur le bouton “Update Results”, le démonstrateur sélectionne les nœuds initiaux pour la marche aléatoire à partir des mots-clés de la requête et des filtres sélectionnés. Cette sélection permet de construire le vecteur initial V_0 .

Etape 2 : La marche aléatoire est lancée avec le vecteur V_0 . Celui-ci est multiplié par la matrice probabiliste de transition pour réaliser des pas aléatoires dans le graphe.

Etape 3 : Le système effectue 7 pas dans le graphe. Cette distance est un compromis qui dépend de la taille du graphe. Un faible nombre de pas favorise les nœuds proches des nœuds initiaux et ne permet pas une exploration suffisante. Un grand nombre de pas avantage les nœuds les plus densément connectés et donne le même résultat indépendamment des nœuds initiaux. Une série de tests du système de recommandation nous a permis de fixer une

distance adaptée à notre graphe. Une fois la marche aléatoire terminée, le vecteur V_7 permet de lire les résultats.

Etape 4 : Le démonstrateur lit le vecteur V_7 . Il sélectionne les règles et éléments contextuels avec le meilleur score. Ce score correspond à la probabilité que la position de la marche aléatoire après 7 pas soit sur ce nœud. Le système affiche alors à l'utilisateur les règles les plus probables ainsi que les filtres les plus pertinents pour chaque sous-contexte.

Etape 5 : Le concepteur peut alors choisir les règles de conception qu'il souhaite consulter dans l'interface web. Les PDF correspondant aux règles choisies sont ouverts par le démonstrateur.

Etape 6 : Le concepteur peut alors lire et analyser les règles ouvertes et se servir de cette information pour son travail de modélisation.

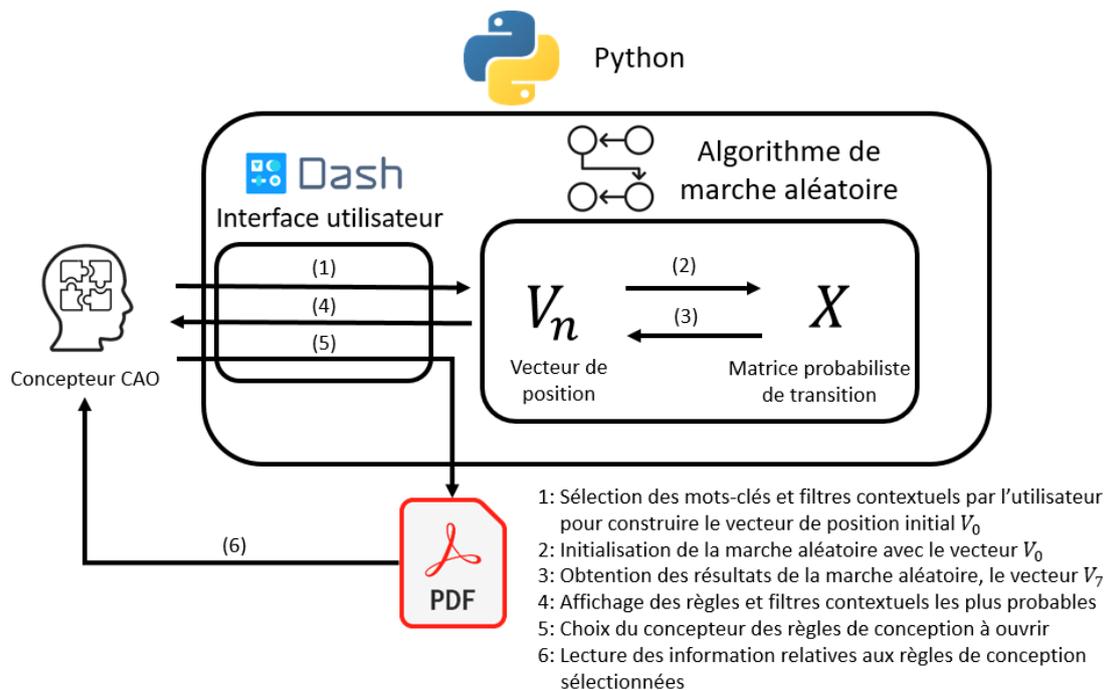


Figure 44 : Structure logicielle de la recommandation de règles de conception

3.2.3 Ecriture des sous-contextes social et numérique

Les sous-contextes social et numérique sont traités à part dans ce chapitre car ils sont les moins directs à mettre en place. En effet, le premier dépend fortement du domaine et le second requière une mise à jour en temps réel et le développement d'un connecteur avec un logiciel de CAO.

3.2.3.1 Sous-contexte social

Le sous-contexte social modélise les informations contextuelles relatives à l'environnement social du concepteur : ses collègues de bureau, son équipe, les experts de son entreprise, etc. Modéliser un tel sous-contexte de façon arbitraire à la main entraînerait de nombreux biais.

Notre approche pour représenter ce sous-contexte est donc d'utiliser les interactions des premiers participants à nos expérimentations avec les règles de conception. Ces participants ayant tous interagis avec un même set de règles pour réaliser la même tâche peuvent représenter les membres d'une même équipe de conception. Le sous-contexte social résultant alors d'interactions réelles avec le démonstrateur, n'est plus soumis au biais de l'arbitraire. Un participant pourra donc voir ses recommandations influencées par les participants précédents via le sous-contexte social.

3.2.3.2 Sous-contexte numérique

La modélisation du sous-contexte numérique nécessite un échange d'information entre notre démonstrateur et un logiciel de CAO. La majorité des logiciels de CAO disposent d'une API²⁰, laquelle permet d'interagir avec la géométrie et l'environnement de modélisation. Cependant, chaque logiciel disposant de sa propre API, il faut développer la capture du sous-contexte numérique pour une plateforme CAO spécifique. Nous avons choisi d'utiliser CATIA dans la 3DEXPERIENCE. L'API de ce logiciel est gérée par un langage spécialisé nommé EKL²¹.

Une action EKL peut explorer toutes les informations relatives à une pièce dans la plateforme, des informations géométriques aux informations du système PLM telle la maturité de la pièce. Ces informations peuvent ensuite être transmises de façon automatique à un serveur externe. Dans le cadre de notre démonstrateur, nous nous focaliserons sur la capture de l'arbre de construction qui structure l'historique de modélisation des features de la pièce en cours de conception.

Le modèle de données du sous-contexte numérique (2.2.3.4) est approfondi pour correspondre aux spécificités de notre environnement CAO (Figure 45). Pour des raisons pratiques, le logiciel (CATIA), l'application de modélisation (PartDesign) et le document CAO modifié sont fixes pour notre démonstrateur. Ils ne font donc pas parti des nœuds capturés par le système. Ce méta-modèle comporte donc des nœuds correspondant à des features de PartDesign (Fillet, Chamfer, Pad, Pocket, Remove et Sketch) et d'autres correspondant à des

²⁰ "Application Programming Interface" ou interface de programmation d'application.

²¹ "Engineering Knowledge Language"

éléments structurels de CATIA (MechanicalRefPlane et GeometricalSet). Ce modèle peut évidemment être étoffé. Nous présentons ici la partie implémentée dans le démonstrateur.

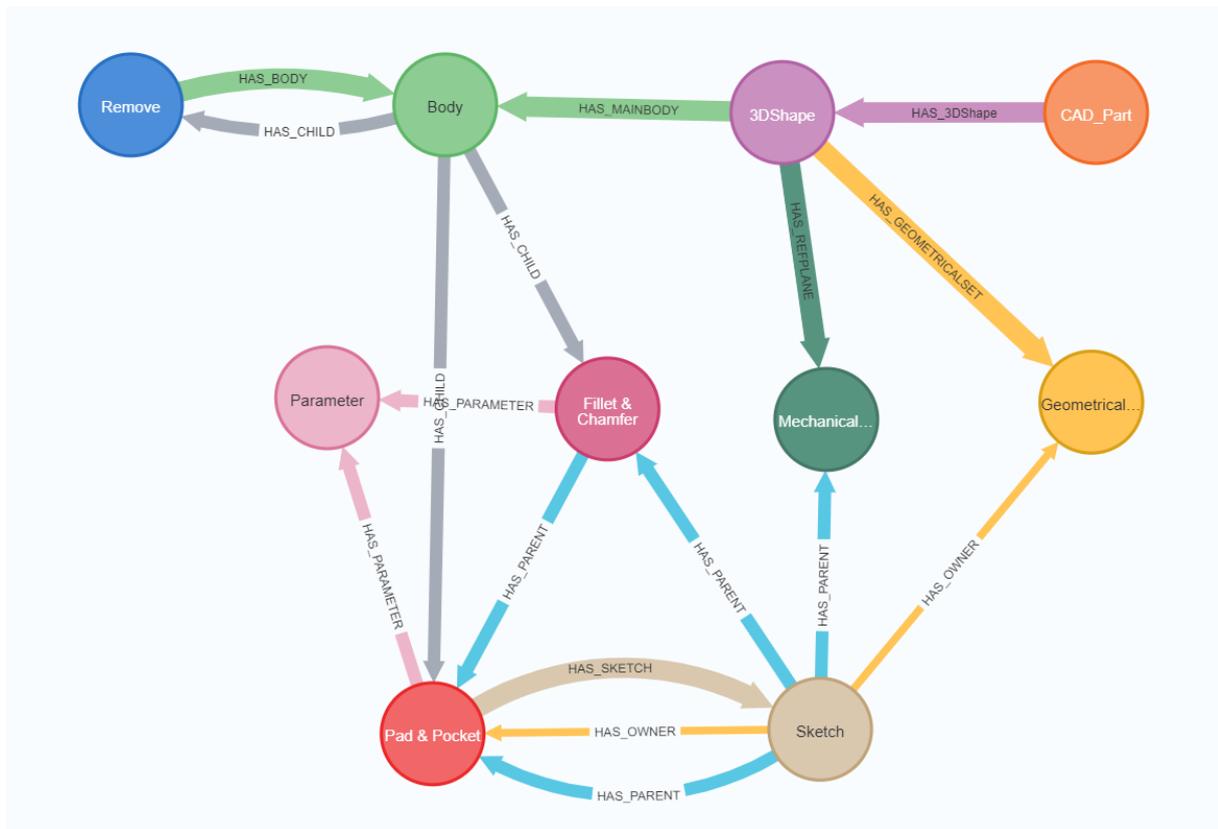


Figure 45 : Sous-contexte numérique capturé par notre démonstrateur

Le sous-contexte numérique est également enrichi des éléments de modélisation et de structure utilisés par CATIA. Les définitions des nœuds additionnels sont données par le Tableau 13. Les relations [[:HAS_PARENT]], [[:HAS_CHILD]] et [[:HAS_OWNER]] représentent des liens structurels entre les différentes données. La relation [[:HAS_PARENT]] indique la source des données nécessaires à une opération. La relation [[:HAS_CHILD]] pointe vers les sous-éléments constituant un ensemble. La relation [[:HAS_OWNER]] indique l'élément sous lequel un "Sketch" est placé. Des exemples de modèles simples et des graphes associés sont illustrés par les Figure 46 et Figure 47. On remarque que l'algorithme de capture s'adapte aux différentes stratégies de modélisation en représentant les relations entre les différentes features.

Remove	Opération booléenne de soustraction volumique entre deux corps
Pad / Pocket	Action de modélisation permettant d'ajouter ou de soustraire de la matière à un corps en fonction d'une distance et d'un contour fermé.
Fillet / Chamfer	Opération de finition réalisée sur l'arête d'une pièce
Sketch	Élément géométrique en deux dimensions
Geometrical Set	Élément de structure regroupant des données non volumiques
Mechanical Ref Plane	Plan de référence d'un corps permettant au logiciel de situer son orientation dans l'espace.

Tableau 13 : Définition des nœuds additionnels du sous-contexte numérique

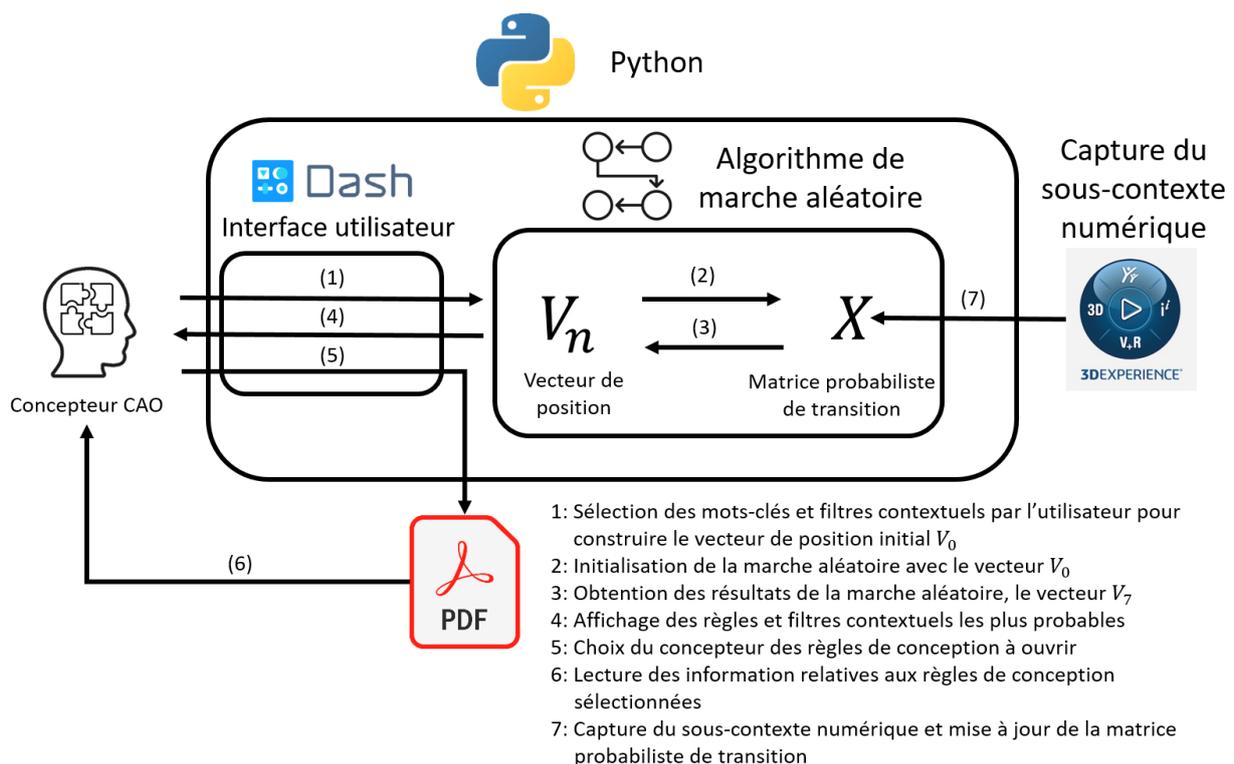


Figure 48 : Processus de recommandation des règles de conception avec capture du sous-contexte numérique

3.3 Synthèse de l'implémentation

Dans ce chapitre, nous avons présenté la démarche d'implémentation d'un démonstrateur de l'environnement de conception intelligent. Ce démonstrateur est une preuve de concept destinée à être utilisée dans le cadre d'expérimentations. La description de son implémentation est essentielle à la répétabilité de nos expérimentations et pourra servir de référence à des améliorations proposées par la communauté scientifique.

Dans un premier temps, ce chapitre détaille la structure logicielle du démonstrateur. Il est programmé en Python et structuré en quatre couches logicielles. La première couche constitue l'interface utilisateur. La deuxième couche regroupe toutes les bibliothèques et tous les outils spécialisés auxquels le démonstrateur a recours lors de son fonctionnement, notamment lors de l'analyse du langage naturel. La troisième couche représente l'interface entre le logiciel et la base de données orientée graphe. La quatrième couche est la base de données orientée graphe NEO4J [97].

La seconde partie de ce chapitre détaille l'implémentation des services identifiés lors de la description fonctionnelle de CACDA (Chapitre 2.1). L'écriture des quatre sous-contextes du processus de conception est présentée. Les sous-contextes sémantique et technique sont extraits de documents en langage naturel spécifiques au domaine d'application. Le sous-contexte social a été construit à partir de l'activité des sujets qui ont participé aux tests.

L'écriture du sous-contexte numérique a nécessité le développement d'un connecteur entre l'environnement de CAO 3DEXPERIENCE et le démonstrateur. Ainsi, notre démonstrateur représente, à une échelle expérimentale, l'ensemble des sous-contextes envisagés dans nos travaux.

Le choix du processus de recommandation et son implémentation sont aussi présentés. En adaptant le principe de l'algorithme ContextWalk proposé par Bogers [160], nous avons développé un système de recommandation prenant en compte l'ensemble de nos sous-contextes. Ce système prend en entrée une liste de mots-clés choisis par l'utilisateur ainsi qu'une liste de filtres contextuels. Il en déduit les règles de conception les plus adaptés à ce besoin ainsi que des listes d'éléments contextuels d'intérêt, lesquels sont utilisés comme filtres contextuels pour la prochaine recherche.

La présentation de l'implémentation du démonstrateur de CACDA a fait l'objet d'un article publié dans la revue scientifique *Advanced Engineering Informatics* [176].

Notre démonstrateur technique représente donc toutes les fonctionnalités de l'assistant intelligent. Son utilisation lors de tests permettra de démontrer la faisabilité de cette approche. La mesure de son impact sur le processus de conception permettra de confirmer notre hypothèse de résolution.

Chapitre 4 _ Validation expérimentale sur cas d'étude industriel

L'objectif de ce chapitre est de démontrer notre hypothèse de recherche : **des recommandations contextuelles de règles de conception permettent d'améliorer le processus de Conception Assistée par Ordinateur.**

Pour cela, dans le chapitre 3, nous avons proposé un assistant intelligent (CACDA) avant de développer dans le chapitre 4 un démonstrateur. Notre objectif est de démontrer l'utilisabilité de ce démonstrateur et d'évaluer son impact sur le processus de conception.

Afin de valider empiriquement la structure de l'assistant, ce chapitre détaille le cas d'étude industriel dans lequel se dérouleront les expérimentations. Les mesures issues de ces expérimentations permettront une validation empirique de la performance de CACDA (Figure 49).

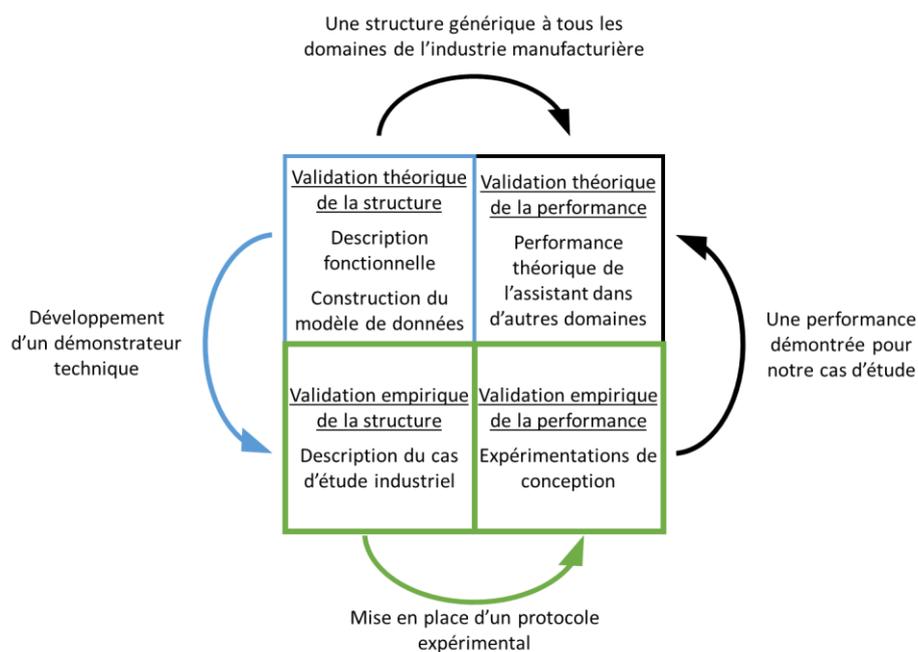


Figure 49 : Validation empirique de CACDA

4.1 Présentation du cas d'étude général

L'évaluation de l'impact de notre démonstrateur sur le processus de conception repose sur un cas d'étude industriel, qui place les participants dans un contexte proche du concepteur opérationnel. Ceux-ci devront réaliser la modélisation 3D d'une pièce technique tout en respectant un ensemble de règles de conception.

Ce cas d'étude sert de référence pour plusieurs expérimentations successives qui utilisent notre démonstrateur technique à différentes phases d'avancement de son développement. Les aspects communs à toutes les expérimentations sont présentés dans cette partie. Les spécificités de chaque expérimentation comme le nombre de participants, les sous-contextes utilisés, le nombre de règles de conception considérées ou les pièces tests (Figure 50) sont détaillées avant l'analyse des résultats.

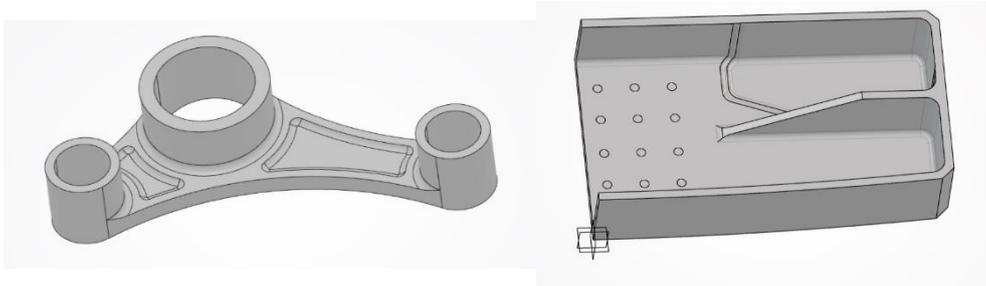


Figure 50 : Pièces test pour les expérimentations

4.1.1 Protocole expérimental

L'objectif étant de démontrer une amélioration de l'exploitation des règles de conception grâce à l'assistant intelligent, nous comparons deux groupes de participants. Seul le moyen d'accéder aux règles de conception diffère entre ces deux groupes (Figure 51).

Le groupe contrôle représente la situation actuelle en entreprise. Les participants de ce groupe ont accès aux règles de conception via un document PDF. Le groupe test quant à lui accède aux mêmes règles de conception par l'intermédiaire du démonstrateur de CACDA. Les deux groupes réaliseront le même travail de modélisation et auront accès aux mêmes règles de conception.

La comparaison entre les performances des deux groupes dans leurs activités de recherche d'information et de modélisation permettra donc de mesurer l'impact de la recommandation de règles sur le processus de conception.

On peut noter qu'on se place dans un cas défavorable puisque notre prototype va exploiter un nombre de règles et de manuels de conception limité. En effet, les participants du groupe contrôle savent que toutes les règles nécessaires à leur tâche se situent dans un document bien précis. Dans l'industrie, les règles applicables peuvent être disséminées dans plusieurs documents volumineux et aux formats parfois différents (PDF, Word, Excel, Base de données, etc.).

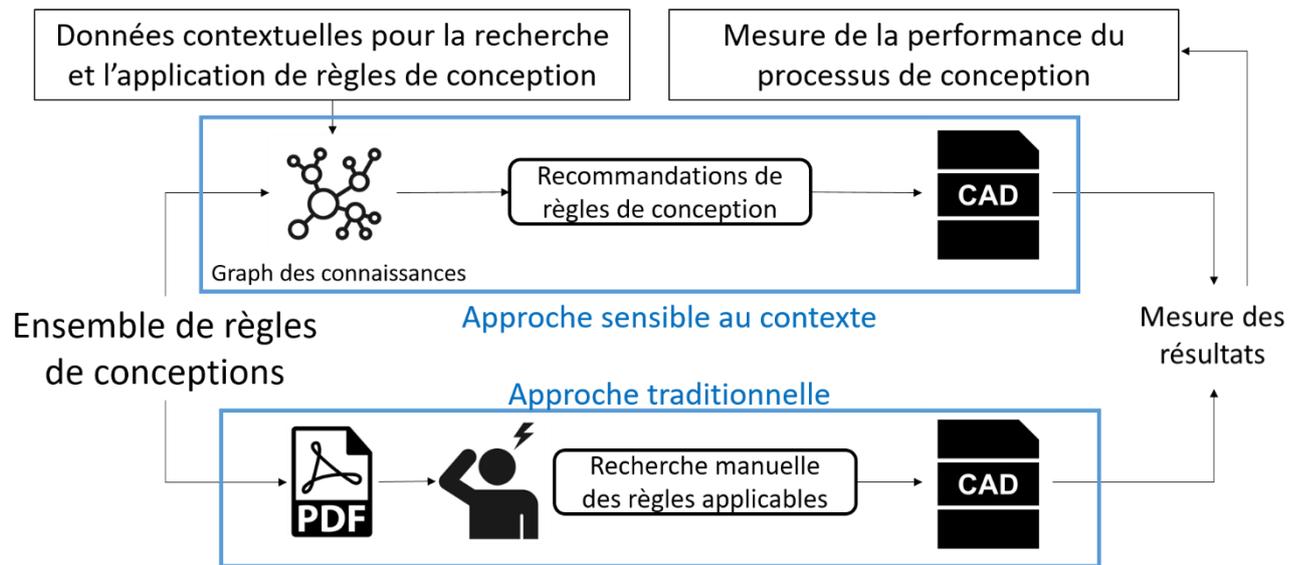


Figure 51 : Schéma du protocole expérimental

4.1.2 Activité de modélisation

Le cas d'étude industriel doit être le plus représentatif possible de la conception en entreprise. Cependant, il n'est pas possible de reproduire de façon expérimentale les conditions exactes de la conception en entreprise. Ainsi, l'activité de modélisation est adaptée pour être réalisable en 2 à 3 heures. De plus, pour savoir si les participants arrivent à identifier les règles applicables, nous devons nous assurer qu'un sous-ensemble de règles soit utile à la conception de la pièce. C'est pourquoi nous proposons des pièces tests, des données initiales et des consignes de conception cohérentes entre elles.

Les pièces tests utilisées sont toutes conçues pour une fabrication en fraisage conventionnel (3 axes) dans un brut d'aluminium. Ce brut est fourni dans les données initiales. Il permet de délimiter le volume maximal de la pièce à concevoir.

Aucun calcul de dimensionnement mécanique n'est nécessaire pour modéliser la pièce test. On suppose que des dimensionnements mécaniques ont préalablement servi pour déterminer des épaisseurs minimums. Le volume de la pièce a donc une limite haute donnée par le brut d'usinage et une limite basse fixée par les limites d'épaisseurs imposées aux participants.

Toujours dans l'objectif de limiter les calculs habituellement nécessaires à la conception, des consignes de dimensionnement permettent aux participants de trancher les choix qui ne sont pas imposés par des règles de conception. Ces consignes sont les suivantes :

- Les participants doivent respecter l'ensemble des règles de conception applicables qu'ils identifient dans la documentation.
- Ils doivent limiter autant que possible le volume de la pièce finale.
- En cas de modélisation de liaisons vissées, les participants doivent sélectionner les vis les plus petites possibles et maximiser leur nombre.

4.1.3 Ensemble de règles de conception

Les règles de conception utilisées dans les tests sont toutes issues de la documentation d'une grande entreprise de l'aéronautique. Elles sont séparées en deux catégories :

- Les règles nécessaires aux participants pour réaliser une pièce sans erreur de conception sont appelées règles applicables. Elles imposent des approches de modélisation, des rayons de congés et des surépaisseurs.
- Les règles non nécessaires aux participants sont appelées règles non applicables. Elles ne concernent pas le contexte de conception de notre cas d'étude. Elles peuvent correspondre à des procédés de fabrication non utilisés pour la pièce test, à d'autres matériaux ou à des parties spécifiques de l'avion.

Le nombre de règles considérées varie d'une expérience à l'autre. Les règles de conception sont cependant toujours plus nombreuses que les règles applicables comme c'est le cas en entreprise.

Une fois l'ensemble de règles fixé pour une expérimentation, un PDF regroupant les extraits de documentations contenant toutes ces règles est construit pour le groupe contrôle. Le graphe de connaissances de l'expérimentation est ensuite modélisé comme indiqué dans la partie 3.2.1 afin que le groupe test puisse accéder à l'ensemble des règles de conception de l'expérimentation via le démonstrateur de CACDA.

4.1.4 Axes de mesure

Afin de quantifier l'impact de notre démonstrateur sur le processus de conception, nous avons identifié quatre axes de mesures susceptibles de comporter des différences entre les deux groupes.

4.1.4.1 Axe de recherche de règles

L'identification des règles de conception applicables à la pièce test représente une part importante de la tâche à réaliser par les participants. Les participants doivent noter les règles de conception qu'ils décident d'utiliser pour la modélisation de leur pièce. Les participants du groupe test disposent d'un numéro de règle fourni par le démonstrateur. Les participants du groupe contrôle doivent copier dans un tableur une partie de l'énoncé de la règle utilisée ainsi que le numéro de page afin que la règle puisse être identifiée pendant l'analyse des résultats. Les participants peuvent à tout moment de l'expérimentation ajouter ou supprimer des règles de cette liste.

Afin de mesurer les performances d'identification des règles applicables, nous réalisons une mesure de précision et de rappel [177]. Pour réaliser cette mesure, on compte comme vrai positif (VP) les règles appliquées qui sont effectivement applicables à la pièce test. Les règles appliquées qui ne sont pas applicables constituent les faux positifs (FP) et les règles applicables non appliquées les faux négatifs (FN). A partir de ces décomptes, on calcule plusieurs indicateurs dont les formules sont données dans le [Tableau 14](#) :

- La précision indique la qualité des règles identifiées. Plus un participant applique des règles non applicables, plus la précision sera faible. Une précision de 0 correspond à un participant n'appliquant que des règles non applicables. Une précision de 1 correspond à un participant appliquant uniquement des règles applicables.
- Le rappel indique la quantité de règles appliquées sur l'ensemble de règles applicables. Plus un participant applique correctement un grand nombre de règles applicables, plus la mesure de rappel est élevée. Un rappel de 0 correspond à un participant n'appliquant aucune règle applicable. Un rappel de 1 correspond à un participant appliquant l'ensemble des règles applicables disponibles dans le corpus.
- Les mesures de précision et de rappel ne suffisent pas pour apprécier la qualité d'une recherche d'information. En effet, il est possible d'avoir une très bonne précision en sélectionnant une seule règle de conception applicable. Inversement, sélectionner l'ensemble des règles permet d'obtenir un rappel de 1. Le facteur F permet de pondérer les scores de précision et de rappel afin d'obtenir un indicateur général de la qualité d'une recherche.
- Le nombre de règles appliquées par les participants peut également varier entre les deux groupes et indiquer un effort de recherche plus important.

Précision	$VP / (VP + FP)$
Rappel	$VP / (VP + FN)$
Facteur F	$2 \times (\text{précision} \times \text{rappel}) / (\text{précision} + \text{rappel})$
Nombre de règles de conception sélectionnées	$VP + FP$

Tableau 14 : Formules des indicateurs de performance pour la recherche de règles de conception.

4.1.4.2 Axe temporel

Les consignes expérimentales n'imposent pas de temps minimum, il est donc possible qu'un groupe soit plus rapide qu'un autre, d'où l'importance de mesurer la durée d'expérimentation des participants. De plus, notre protocole expérimental impose deux activités : la modélisation 3D et la recherche de règles. Aucune répartition de temps entre ces activités n'est imposée aux participants. Il est donc nécessaire de mesurer le temps passé sur chaque activité par les participants. Il est difficile de différencier le temps passé à rechercher une règle, à la lire et à la comprendre. Nous mesurons donc le temps passé à modéliser activement la pièce. La différence entre la durée de modélisation et la durée totale de l'expérimentation est considérée comme étant consacrée à la recherche et la compréhension des règles de conception. Le temps dédié à autre chose qu'aux deux activités de l'expérimentation n'est pas décompté.

4.1.4.3 Axe cognitif

L'un des objectifs principaux d'un assistant cognitif est de réduire la charge cognitive de ses utilisateurs. Il est donc nécessaire de mesurer cette charge cognitive lors de nos expérimentations. La méthode la plus standard et reconnue pour mesurer la charge cognitive d'une activité est le NASA-TLX [178]. La charge cognitive est décrite comme le cumul de six facteurs : l'exigence mentale, physique, temporelle, la performance, l'effort et la frustration. Les participants doivent noter leur ressenti personnel pour chacun de ces facteurs sur un axe gradué de zéro à cent (Figure 52). NASA-TLX est considéré par la communauté scientifique comme un outil approprié pour représenter la charge cognitive d'une personne ou la difficulté d'une opération de conception [179], [180].

Exigence mentale : Quel degré d'activité mentale était exigé pour réaliser l'expérimentation ?



Exigence physique : Quel degré d'activité physique était exigé pour réaliser l'expérimentation ?



Figure 52 : Echelles graduées NASA-TLX pour l'exigence mentale et physique

Afin de compléter la mesure globale de la charge cognitive, nous mesurons également la difficulté ressentie par les participants pour la recherche de règles de conception et la modélisation. Ces mesures sont présentées de façon similaires aux échelles graduées NASA-TLX.

4.1.4.4 Axe de qualité du modèle numérique

Le respect des règles de conception est l'objectif final de notre démonstrateur. La pièce finale des participants est analysée en fin d'expérimentation afin d'attribuer un score de respect des règles de conception. La notation la plus intuitive serait de noter les erreurs de conception des participants. Cependant cela avantagerait les participants n'allant pas au bout de leur conception et donc ne prenant pas le risque de commettre d'erreurs. Le score d'application des règles de conception décompte donc le nombre de règles correctement appliquées. Le score est augmenté de 1 pour chaque règle appliquée avec succès et de 0.5 si la règle n'est que partiellement respectée.

Une règle identifiée par un concepteur peut ne pas être correctement appliquée, pour des raisons de temps ou de compréhension. Mesurer le nombre de règles correctement identifiées par les participants mais non respectées dans leurs modèles peut permettre d'identifier une telle tendance.

L'une des consignes de conception étant de minimiser le volume de la pièce, on mesure le volume final des pièces afin de détecter d'éventuelles différences de performances entre les deux groupes.

4.2 Pré-expérimentations

4.2.1 Présentation

Les pré-expérimentations ont été réalisées afin de valider les premières étapes du développement du démonstrateur. Elles ont pour objectif de valider l'utilisabilité du démonstrateur et son bon fonctionnement, mais également de mettre à l'épreuve et d'améliorer notre cas d'étude et notre protocole expérimental. La mesure de la charge cognitive des participants n'a pas été effectuée pour ces pré-expérimentations.

Seul le sous-contexte sémantique a été utilisé lors de ces expérimentations. Le nombre de règles de conception utilisées lors de ce test est de 45 règles dont 9 applicables à la pièce test.

La pièce test pour ces expérimentations comporte trois opérations d'usinage. Le brut d'usinage fourni aux participants est présenté à la Figure 54. On peut également voir sur cette figure l'esquisse de la première poche, une donnée initiale pour indiquer les épaisseurs de parois des perçages. La Figure 53 présente quant à elle la pièce finale attendue pour ces pré-expérimentations.

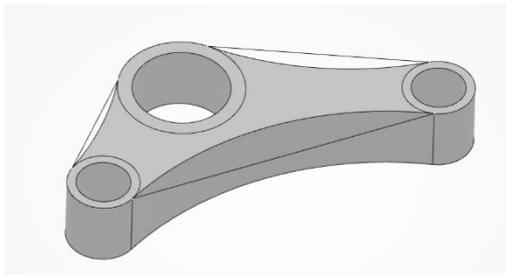


Figure 54 : Brut d'usinage de la pièce test pour les pré-expérimentations

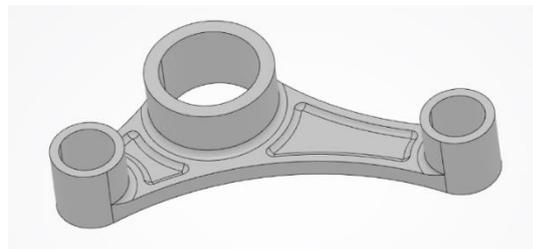


Figure 53 : Pièce finale attendue pour les pré-expérimentations

4.2.2 Panel de participants

Notre panel pour ces pré-expérimentations est composé de 5 participants, tous de sexe masculin avec une moyenne d'âge de 30,6 ans. Trois d'entre eux ont un niveau débutant en modélisation, les deux autres ont un niveau intermédiaire. Aucun d'entre eux n'avait connaissance des règles de conception utilisées pour ce test. Les deux participants expérimentés avaient déjà participé à des projets de conception impliquant une dizaine de règles. Les autres participants n'avaient jamais utilisé de règles de conception avant ces expérimentations.

Tous les participants ont des compétences de modélisation et de conception mais n'ont pas ou peu d'expériences préalables d'utilisation de règles de conception. Ils peuvent donc

représenter pour notre cas d'étude des concepteurs inexpérimentés. Le groupe test est composé de 3 personnes et le groupe contrôle de 2. Les deux participants avec une maîtrise intermédiaire de l'outil CAO sont dans le groupe test.

4.2.3 Analyse des résultats

Cette partie présente les résultats des pré-expérimentations. Pour chacun des trois axes de mesure réalisés, nous présentons les données brutes suivies d'une interprétation des résultats :

Axe de recherche des règles

Les résultats détaillés des pré-expérimentations pour l'axe de recherche des règles de conception sont présentés dans le Tableau 15. Les moyennes pour chaque groupe sont présentées dans le Tableau 16.

Participants	1	2	3	4	5
Niveau de maîtrise de l'outil CAO	Novice	Novice	Novice	Intermédiaire	Intermédiaire
Groupe	Contrôle	Contrôle	Test	Test	Test
Vrai Positif	2	3	2	4	2
Faux Positif	5	4	1	2	2
Vrai Négatif	31	32	35	34	34
Faux Négatif	7	6	7	5	7
Précision	0.29	0.43	0.67	0.67	0.5
Rappel	0.22	0.33	0.22	0.44	0.22
Facteur F	0.25	0.38	0.33	0.53	0.31

Tableau 15 : Résultats détaillés de la recherche de règles pour les pré-expérimentations

	Précision	Rappel	Facteur F
Groupe contrôle	0.36	0.28	0.31
Groupe test	0.61	0.3	0.39

Tableau 16 : Moyennes par groupe des scores de l'axe de recherche des règles

Les résultats indiquent de meilleurs scores pour le groupe test. Les participants ont tous correctement identifié entre 2 et 4 règles applicables sur 9, donnant des scores de rappel similaires. Cependant, les participants du groupe test ont sélectionné moins de règles non applicables. Il en résulte un score de précision bien supérieur au groupe contrôle et un Facteur F légèrement supérieur.

La difficulté de la tâche de recherche de règles, à réaliser en parallèle de la modélisation, peut expliquer le faible taux de rappel dans les deux groupes. Les participants doivent identifier, assimiler et utiliser les règles de conception en un temps réduit. De plus, aucun des participants n'est habitué à l'anglais technique utilisé dans les énoncés des règles de conception.

Certaines règles de conception n'ont été identifiées par aucun participant. Il y a donc des améliorations à apporter sur l'adéquation de la pièce test avec notre ensemble de règles de conception pour les futures expérimentations.

Axe temporel

Les résultats de l'axe temporel sont présentés dans le Tableau 17. Les participants ont pris un temps similaire pour la réalisation de leur expérimentation. On remarque que le groupe test a attribué plus de temps à la modélisation. Ce résultat est cohérent avec ceux de la recherche de règles. Les participants du groupe test ont identifié plus rapidement un plus faible nombre de règles que ceux du groupe contrôle. L'objectif d'un assistant cognitif étant de libérer du temps et de la concentration pour les tâches essentielles, ce résultat est encourageant.

	Durée d'expérimentation	Durée de modélisation en pourcentage de la durée totale
Groupe contrôle	1h26min	37.2%
Groupe test	1h17min	55.6 %

Tableau 17 : Résultats de l'axe temporel des pré-expérimentations

Axe de qualité du modèle numérique

La qualité du modèle numérique pour ces pré-expérimentations est représentée par le volume final de la pièce et le nombre d'erreurs de conception. Les résultats des deux groupes sont présentés dans le Tableau 18.

	Nombre d'erreurs de conception	Volume final de la pièce en cm ³
Groupe contrôle	3.5	194.3
Groupe test	3.7	174.7

Tableau 18 : Résultats de l'axe de qualité du modèle numérique des pré-expérimentations

Le nombre d'erreurs de conception est similaire dans les deux groupes. Le décompte des erreurs de conception n'a pas entraîné de biais car, en raison de la simplicité de la pièce test, tous les participants sont allés au bout de leur conception. Dans les expérimentations suivantes, cette mesure sera remplacée par le nombre de règles correctement appliquées tel que présenté dans la partie 4.1.4.4.

Le volume de la pièce final est en moyenne inférieur de 19,6 cm³ dans le groupe test, soit une réduction de volume de 10% par rapport au groupe contrôle. Cette réduction peut être attribuée à une plus grande confiance dans la conception résultant d'une meilleure compréhension des règles et d'un temps de conception plus important dans le groupe test.

Les résultats de cet axe sont encourageants et méritent d'être améliorés dans des expérimentations plus approfondies.

4.2.4 Limitations et synthèse

Ces pré-expérimentations avaient pour objectif principal de tester l'utilisabilité de la première version fonctionnelle de notre démonstrateur. A ce titre, les résultats sont concluants car notre logiciel a été utilisé sans difficultés majeures et sans impacts négatifs sur le processus de conception en comparaison de la documentation PDF.

Cependant, l'échelle de ces pré-expérimentations ainsi que l'état d'avancement du démonstrateur implique des limitations majeures :

- Le démonstrateur de l'environnement de conception intelligent utilisé dans ces expérimentations est dans une phase précoce de son développement. Un seul des quatre sous-contextes envisagés est implémenté. Des expérimentations avec une version plus avancée du démonstrateur sont nécessaires pour statuer sur l'apport de notre approche.
- Le cas d'étude pour ces pré-expérimentations est de faible envergure. L'ensemble des règles de conception considérées est constitué de 45 règles alors que les manuels de conception en comptent des centaines. De plus, la pièce test est très simple et ne permet pas de représenter les pièces habituellement dessinées dans l'industrie.

- Le faible nombre de participants limite également fortement les possibilités d'interprétation des résultats. Cependant, même un faible nombre de participants peut permettre d'identifier la majorité des défauts ou problèmes d'utilisabilité majeurs [181]. Ces pré-expérimentations représentent un premier pas dans notre processus de recherche. Des expérimentations plus poussées avec de plus nombreux participants sont donc nécessaires pour confirmer l'intérêt et la faisabilité d'un environnement de conception intelligent pour améliorer l'utilisation des règles de conception.
- L'équilibre entre les deux groupes est une limitation moins importante que le nombre de participants mais doit cependant être mentionné. Le groupe test comporte un participant de plus que le groupe contrôle. De plus, les participants ayant une maîtrise de niveau intermédiaire du logiciel de CAO sont tous dans le groupe test. Une attention particulière sera donc apportée à l'équilibre des groupes dans les futures expérimentations.
- Notre cas d'étude ne représente pas de façon fidèle le travail d'un concepteur dans l'industrie. L'appropriation d'un ensemble de règles de conception peut prendre plusieurs jours à plusieurs semaines. Notre cas d'étude impose de concentrer la recherche, la compréhension et l'utilisation des règles de conception dans un temps très court. Cependant, la comparaison avec un groupe contrôle mis dans les mêmes conditions expérimentales permet de contrebalancer cette limitation.

De façon générale, les résultats indiquent un impact positif à la recommandation de règles de conception par rapport à l'utilisation d'une documentation non structurée. Le groupe test a une meilleure précision dans l'identification des règles de conception et obtient une pièce finale moins volumineuse tout en diminuant le temps consacré à la recherche de règles. Il s'agit donc de pré-expérimentations encourageantes et appelant des expérimentations plus approfondies.

4.3 Expérimentations de faisabilité

4.3.1 Présentation

L'objectif de ces expérimentations est de démontrer l'utilisabilité de notre démonstrateur, ainsi que son impact positif sur l'efficacité d'utilisation des règles de conception. L'utilisabilité se définit comme la capacité d'un système à être utilisé facilement et efficacement par ses utilisateurs [182]. L'utilisabilité est constituée de différents facteurs comme la facilité d'utilisation et d'apprentissage mais aussi la satisfaction des utilisateurs [183]. Lors des pré-expérimentations, nous avons vu la nécessité d'approfondir notre protocole expérimental en utilisant plus de règles de conception et une pièce test plus complexe. C'est pourquoi, pour

ces expérimentations de faisabilité, nous avons indexé 102 règles de conception dans notre ensemble et choisi une pièce test pour laquelle 25 d'entre elles sont applicables.

La pièce test est plus complexe que pour les pré-expérimentations. Elle est directement inspirée d'une pièce réelle issue de l'industrie aéronautique, et donc beaucoup plus représentative de la réalité. Le brut de la pièce (Figure 56), les épaisseurs minimums des murs de renfort (Figure 55) ainsi que des fonds de poches sont les données d'entrées géométriques fournies aux participants. On donne aussi plusieurs objectifs de conception. Le renfort central doit finir en fond de poche et une liaison vissée doit être modélisée sur la surface centrale de la pièce.

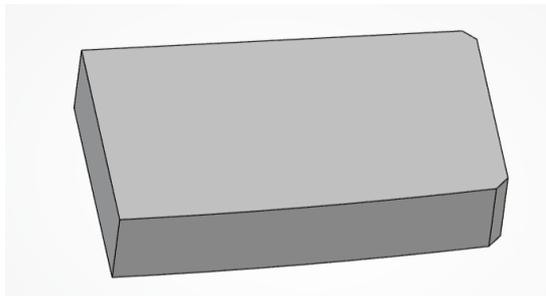


Figure 56 : Brut de la pièce test des expérimentations de faisabilité

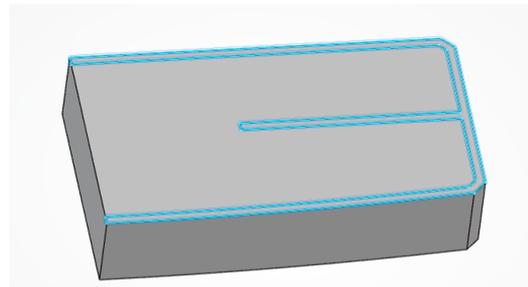


Figure 55 : Esquisse de l'épaisseur minimum des murs de renfort.

Ainsi, la pièce test est conçue pour être réalisée en quatre phases de conception :

1. Modéliser la poche principale (Figure 57).
2. Modéliser la pente du renfort central afin qu'il finisse en fond de poche (Figure 58).
3. Modéliser la sous-poche située en haut à droite de la pièce (Figure 59). En effet, l'épaisseur minimum en fond de poche est inférieure de 4mm à cet endroit par rapport au reste de la pièce. Les participants sont donc incités à modéliser cette sous-poche afin de limiter le volume de la pièce.
4. Représenter sous forme d'esquisse la liaison vissée de la pièce sur la surface centrale (Figure 60).

Les participants n'ont pas connaissance de ces étapes qui sont attendues et non pas imposées. Ils sont donc libres d'appliquer d'autres stratégies de conception pour arriver à un résultat similaire.

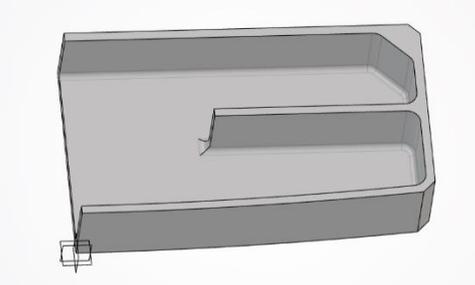
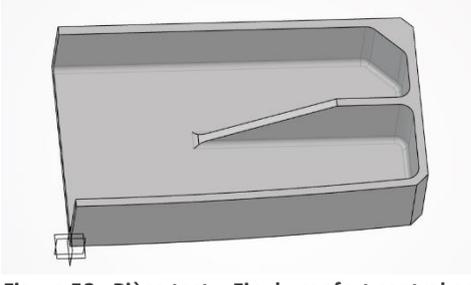
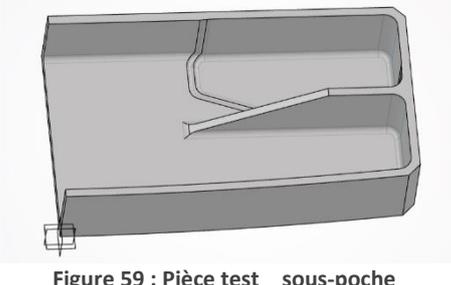
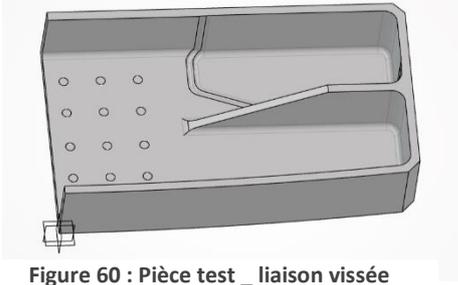
Etapes de conception attendues pour la pièce test des expérimentations de faisabilité	
 <p>Figure 57 : Pièce test _ poche principale</p>	 <p>Figure 58 : Pièce test _ Fin du renfort central en fond de poche</p>
 <p>Figure 59 : Pièce test _ sous-poche</p>	 <p>Figure 60 : Pièce test _ liaison vissée</p>

Tableau 19 : Etapes de conception de la pièce test

4.3.2 Panel de participants

Notre panel de participants comporte 14 élèves ingénieurs niveau M2. Ces participants ont une maîtrise novice à intermédiaire du logiciel de CAO utilisé. Leur cursus d'ingénieur prévoit au minimum 40 heures de cours de CAO. La plupart d'entre eux ont déjà travaillé avec des ensembles d'une dizaine de règles de conception dans le cadre de projets étudiants. Ces règles sont sélectionnées par les professeurs en fonction du projet. Ils n'ont donc jamais eu à rechercher des règles de conception dans une documentation professionnelle. Ils n'ont aucune connaissance préalable des règles utilisées dans les expérimentations. Ils représentent donc bien, comme pour les pré-expérimentations, des concepteurs novices dans leur domaine industriel. Les deux groupes sont équilibrés et leur répartition est détaillée dans le Tableau 20. Le niveau de maîtrise de l'outil CAO ainsi que la répartition homme/femme des participants est donnée pour des raisons de transparence et d'équilibre entre les groupes. Notre objectif dans ces expérimentations n'est pas de différencier les participants sur ces critères.

	Nombre de participants	Age moyen	Niveau de maîtrise de l'outil CAO			Sexe	
			Novice	Intermédiaire	Expert	Homme	Femme
Groupe contrôle	7	23,4	4	3	0	5	2
Groupe test	7	23,4	5	2	0	5	2

Tableau 20 : répartition des groupes pour les expérimentations de faisabilité

4.3.3 Analyse des résultats

Pour ces expérimentations, nous avons mesuré les quatre axes identifiés dans la partie 4.1.4. Le nombre de participants pour ces expérimentations de faisabilité nous permet d'effectuer des tests T d'échantillons indépendants afin de comparer les moyennes de nos deux groupes [184]. Cette analyse sur la variance de nos données nous permet d'associer un facteur P à nos mesures. Une valeur de P en dessous de 0.05 nous permet d'écarter l'hypothèse nulle, c'est-à-dire l'hypothèse que la différence de moyenne observée soit due au hasard. On associe également à chaque mesure la valeur de son écart-type, noté ET.

Les sous-parties suivantes présentent pour chaque axe de mesure les résultats bruts ainsi que leurs interprétations. Une interprétation générale de ces expérimentations est réalisée en fin de partie.

Axe de recherche des règles

Le Tableau 21 présente les résultats des deux groupes pour l'axe de recherche des règles. Ces résultats ne montrent pas de différence significative entre les deux groupes. On remarque cependant que les écarts entre les valeurs moyennes vont dans le sens de notre hypothèse, avec un rappel et un facteur F plus élevés dans le groupe test. On remarque également le nombre plus élevé de règles sélectionnées dans le groupe test, ce qui est cohérent avec un meilleur rappel à précision constante. On remarque également que les résultats du groupe test sont plus homogènes avec des écarts-types réduits pour toutes les mesures.

	Précision	Rappel	Facteur F	Nombre de règles sélectionnées
Control group	0.49 (ET = 0.26)	0.18 (ET = 0.13)	0.25 (ET = 0.16)	8.6 (ET = 5.3)
Test group	0.53 (ET = 0.13)	0.26 (ET = 0.04)	0.34 (ET = 0.05)	12 (ET = 3.7)
Facteur P	0.757	0.155	0.152	0.187

Tableau 21 : résultats de l'axe e la recherche de règles des expérimentations de faisabilité.

Axe temporel

Les résultats de l'axe temporel présentés par le Tableau 22 n'indiquent pas de différence significative entre les deux groupes. Une grande partie des participants n'a pas pu aller au bout de la modélisation de leur pièce test. Ainsi, même si aucune limite formelle de temps n'était imposée, les participants ont donc en général utilisé la totalité du temps qu'ils pouvaient accorder aux expérimentations.

	Durée totale de l'expérience	Temps de recherche des règles de conception
Groupe contrôle	2h 12min (ET = 15.59 min)	52min 18s (ET = 14.88 min)
Groupe test	2h 19min (ET = 18.18 min)	48min 30s (ET = 20.54 min)
Facteur P	0.402	0.699

Tableau 22 : Résultats de l'axe temporel pour les expérimentations de faisabilité

Axe de qualité du modèle numérique

Les résultats de l'axe de qualité du modèle numérique sont présentés dans le Tableau 23. On observe que le nombre de règles correctement appliquées est environ deux fois plus élevé dans le groupe test que dans le groupe contrôle. Cette différence est significative comme l'indique le facteur P inférieur à 0,05 pour cette mesure.

Il n'y a pas de différence significative dans le pourcentage d'erreurs de conception sur des règles identifiées. On note toutefois que l'écart entre les moyennes des deux groupes est important et va dans le sens de notre hypothèse. La non-significativité est liée à la variabilité des résultats, en particulier dans le groupe contrôle.

Aucune différence n'est mesurée concernant le volume finale de la pièce test. Cela peut être due à des épaisseurs minimums mieux communiquées dans les consignes. L'impact des erreurs de conception sur cette mesure ne peut pas être quantifié car une erreur peut indistinctement augmenter ou réduire le volume de la pièce voir compenser une autre erreur.

Pour cet axe de mesure aussi, on remarque que les écart-types sont systématiquement très inférieurs dans le groupe contrôle par rapport au groupe test.

	Nombre de règles de conception correctement appliquées	Pourcentage d'erreur sur les règles identifiées	Volume final de la pièce (cm ³)
Groupe contrôle	4.29 (ET = 2.8)	62.37 (ET = 35.48)	465 (ET = 96)
Groupe test	8.57 (ET = 1.3)	24.69 (ET = 8.56)	454 (ET = 37.1)
Facteur P	0.003	0.155	0.782

Tableau 23 : résultats de l'axe de qualité du modèle numérique pour les expérimentations de faisabilité

Axe cognitif

Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente les résultats de l'axe cognitif. On n'observe pas de différence entre les charges cognitives des deux groupes. La Figure 61 détaille la mesure de la charge cognitive. Un point représente le score d'un participant et une croix le score moyen des participants pour cette dimension de la charge cognitive.

Les scores d'exigence mentale et physique, ainsi que le score de performance sont similaires dans les deux groupes. Les scores d'effort et de frustration sont légèrement plus élevés dans le groupe contrôle. Les scores d'exigence temporelle sont divisés entre des hauts scores (plus de 70) et des bas scores (entre 30 et 40). L'exigence temporelle est plus élevée dans le groupe test car de plus nombreux participants ont eu le sentiment de manquer de temps. Ce résultat est cohérent avec les résultats de recherche des règles. Les participants du groupe test ont identifiés plus de règles et ont donc eu moins de temps par règle pour les respecter. En général, les scores de charges cognitives varient grandement entre les candidats.

	Charge cognitive	Difficulté de recherche	Difficulté de la modélisation	Difficulté totale
Groupe contrôle	51.90 (ET = 11.96)	75 (ET = 12.90)	60.70 (ET = 19.90)	65.70 (ET = 12.40)
Groupe test	52.38 (ET = 13.11)	43.55 (ET = 19.75)	43.55 (ET = 23.40)	50 (ET = 13.80)
Facteur P	0.945	0.004	0.165	0.079

Tableau 24 : charges cognitives et difficultés perçues pour les expérimentations de faisabilité

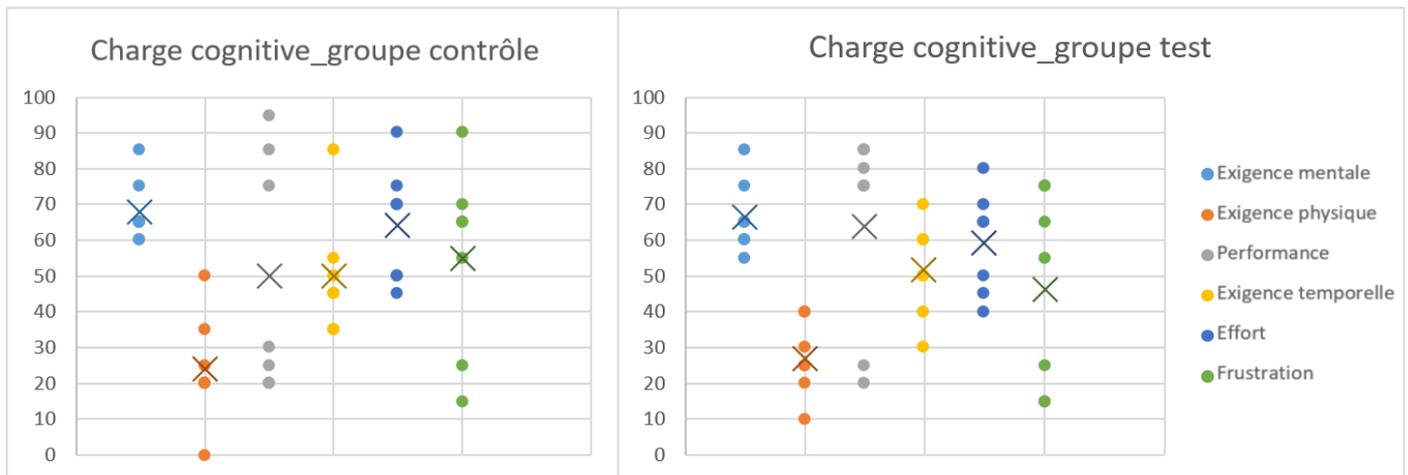


Figure 61 : Mesures de charges cognitives des expérimentations de faisabilité

Les scores de difficulté perçue sont moins variables que ceux de la charge cognitive. La difficulté de recherche des règles de conception est inférieure de 30 points dans le groupe test et ce de façon significative. Les difficultés de modélisation et de l'activité totale présentent des différences plus faibles et non significatives entre les deux groupes. On remarque néanmoins la faible valeur du facteur P pour ces mesures. Celui-ci est légèrement supérieur à 0.05 pour la difficulté totale. Les écarts de moyennes pour ces deux mesures vont également dans le sens de notre hypothèse avec des difficultés ressenties plus faibles dans le groupe test de 15 points environ.

Interprétation générale

Des résultats significatifs allant dans le sens de notre hypothèse ont été mesurés sur le nombre de règles correctement appliquées aux modèles numériques, ainsi que sur la difficulté perçue de la recherche des règles de conception.

Les différences non significatives mesurées dans l'axe de recherche des règles de conception ne permettent pas à elles seules d'expliquer les meilleurs résultats du groupe test dans l'axe de qualité du modèle numérique. Nous identifions deux causes possibles :

1. La recherche des règles de conception a été plus simple pour le groupe test, qui utilise notre démonstrateur. Néanmoins, ce groupe a utilisé autant de temps pour sa recherche et témoigne d'une charge cognitive similaire au groupe contrôle. Ainsi, le temps et les ressources cognitives économisées par le groupe test lors de la pré-sélection des règles par notre démonstrateur ont pu être utilisés pour une meilleure compréhension de celles-ci et une application plus efficace dans le modèle numérique.

2. Une différence dans la stratégie de recherche peut également expliquer ces résultats. La recherche avec notre démonstrateur se fait uniquement sur les énoncés des règles de conception. Un participant du groupe test part donc d'un besoin précis et recherche des règles correspondantes. A contrario, l'utilisation de PDF permet un type de recherche inaccessible au groupe test, à savoir un parcours visuel rapide de la documentation, permettant d'identifier des schémas et images similaires au contexte de conception des participants. Cette stratégie

permet de trier rapidement des règles parmi un grand ensemble, mais peut poser des difficultés de compréhension et d'interprétation de règles ne correspondant pas au besoin instantané des participants.

On observe également une forte variabilité dans l'ensemble des résultats. Cette variabilité est probablement due à la liberté laissée aux participants sur leur stratégie de recherche et de modélisation. Cette liberté est représentative du contexte industriel jusqu'à un certain point. Les stratégies de certains participants ne seraient pas adaptées à un cas industriel. Par exemple, certains candidats ont tenté d'identifier l'ensemble des règles applicables avant de débiter la modélisation, augmentant ainsi leur score de recherche des règles au détriment de l'avancement et de la qualité du modèle numérique. Les écart-types plus faibles observés dans de nombreuses mesures du groupe test, indiquent que l'utilisation de notre démonstrateur aide à limiter l'impact des stratégies individuelles dans le processus de conception. Cet effet n'est pas suffisamment puissant pour provoquer une amélioration significative des scores de recherche des règles.

4.3.4 Limitations et synthèse

Ces expérimentations ont démontré l'utilisabilité de notre démonstrateur. Il a été utilisé avec succès par sept participants et n'a entraîné aucun impact négatif sur leurs performances, malgré le fait qu'il s'agisse d'un outil nouveau. Ainsi, même si les performances de notre démonstrateur peuvent être améliorées, son utilisabilité est démontrée.

Elles ont également mesuré l'impact du démonstrateur sur le processus de conception selon quatre axes de mesures. La difficulté perçue de la recherche des règles de conception est diminuée de trente points sur une échelle de 100 par rapport à l'utilisation de documents PDF. De plus, les participants du groupe test ont pu appliquer avec succès deux fois plus de règles de conception que dans le groupe contrôle. Nous pouvons donc conclure à un impact globalement positif de l'utilisation de notre démonstrateur sur le processus de conception.

Plusieurs limitations sont cependant à prendre en compte dans l'interprétation de ces résultats :

- La principale limitation est liée à notre panel de participants, constitué uniquement de 14 personnes. Ce faible nombre ne permet de mesurer que les impacts les plus forts. De plus, les participants ne sont pas nos utilisateurs cibles. En effet, bien qu'ils aient une maîtrise de la conception et du logiciel CAO utilisé, ils ne sont pas des concepteurs professionnels de l'industrie manufacturière. Cette problématique est très fréquente dans les expérimentations de conception, qui nécessitent des tâches expérimentales longues et complexes [134], [180], [185], [186].
- Les limites de notre cas d'étude, identifiées pour les pré-expérimentations restent vraies mais dans une moindre mesure. Notre cas d'étude impose une activité de conception

menée parallèlement à la recherche de règles inconnues, le tout en un temps limité. En effet, une séance ne peut durer plus de 4 heures alors qu'un concepteur dans l'industrie peut prendre plusieurs jours pour s'habituer à un nouvel ensemble de règles de conception et bénéficier de l'aide d'experts. On note néanmoins que la complexité de la pièce test ainsi que le nombre de règles de conception considérées sont plus proches de la réalité même si toujours éloignés d'un contexte industriel. Nous pensons que l'utilisation du démonstrateur a un impact plus fort lorsque les règles de conception sont nombreuses. De futures expérimentations avec plus de règles pourraient permettre de le vérifier.

- La dernière limitation reste l'état d'avancement du développement du démonstrateur. Cette limitation est à nouveau moins prononcée que pour les pré-expérimentations. Les sous-contextes social et numérique manquent encore afin de pouvoir tester notre proposition dans son ensemble. De futures expérimentations avec un graphe de connaissances complet et mis à jour selon le contexte numérique du concepteur seront nécessaires.

On peut finalement conclure à un impact positif du démonstrateur sur le processus de conception. L'importance des limitations a été réduite entre les pré-expérimentations et les expérimentations de faisabilité et devront l'être encore dans de futurs tests. Notamment, nous avons l'ambition de faire participer à nos expérimentations un panel de professionnels avec un démonstrateur complet, utilisant les quatre sous-contextes de notre proposition.

4.4 Synthèse des expérimentations

L'objectif de nos expérimentations est de valider notre hypothèse de recherche : des recommandations contextuelles de règles de conception permettent d'améliorer le processus de Conception Assistée par Ordinateur.

Afin de mesurer cet impact, nous avons construit un protocole expérimental permettant de comparer deux groupes. Un groupe contrôle accède à un ensemble de règles de conception par une documentation traditionnelle sous forme de PDF. Un groupe test accède à ces mêmes règles de conception par un démonstrateur, représentant un assistant intelligent sensible au contexte. On mesure l'impact de cette différence entre les groupes sur la conception d'une pièce que les participants doivent modéliser dans le respect des règles de conception.

Afin de quantifier cet impact, nous avons identifié quatre axes de mesures : un premier axe centré sur la performance de recherche des règles de conception, un second axe temporel, un axe cognitif et un axe de la qualité finale du modèle numérique. Ce protocole expérimental permet de valider empiriquement la structure de notre proposition selon le carré de validation.

Des pré-expérimentations nous ont permis de tester l'aspect fonctionnel de notre démonstrateur et d'améliorer notre protocole expérimental. Des expérimentations plus

approfondies nous ont permis de prouver la faisabilité de notre approche. Nous avons mis en évidence des impacts positifs sur la qualité du modèle numérique et la difficulté perçue de la recherche des règles. Globalement, les mesures effectuées vont dans le sens d'un impact positif du démonstrateur sur le processus de conception et donc renforcent notre confiance dans l'hypothèse de recherche. Ces mesures quantitatives permettent de valider empiriquement la performance de l'assistant intelligent.

Toutefois, il est nécessaire d'approfondir les recherches afin de valider définitivement notre hypothèse. De nouvelles expérimentations basées sur un protocole similaire mais comportant un ensemble de règles de conception plus large, un panel de professionnel et un démonstrateur abouti sont en cours.

Conclusion et perspectives

A. Validation des apports

Nos travaux de thèse ont permis de proposer un assistant intelligent dédié aux règles de conception pour l'industrie manufacturière. Cet assistant repose sur une approche centrée sur le concepteur afin d'améliorer la maîtrise des règles de conception. Nous avons ainsi fixé trois exigences à l'assistant intelligent :

- L'assistant intelligent doit être en mesure de recommander à un concepteur, en temps réel, des règles applicables à son contexte de conception.
- L'utilisation de l'assistant intelligent doit permettre une meilleure maîtrise de l'ensemble des règles de conception.
- Les recommandations de règles de l'assistant intelligent doivent permettre d'améliorer l'efficacité du processus de Conception Assisté par Ordinateur.

Afin de valider ces exigences, nous nous appuyons sur la méthode du carré de validation [161]. Selon cette méthode, les exigences structurelles et empiriques sont validées séparément, de façon théorique et empirique.

I. Validation de la structure

L'évaluation de la structure est une évaluation qualitative de notre apport. Elle revient donc à se poser les questions suivantes :

- Les méthodes de construction de CACDA permet-elle de répondre aux exigences ?
- Le cas d'étude mis en place pour tester notre approche est-il pertinent ?

Validation théorique de la structure

L'assistant intelligent a été construit pour améliorer la maîtrise des règles de conception. Pour cela, il s'appuie sur trois axes identifiés dans l'état de l'art :

- Les règles de conception en langage naturel sont directement interprétées par l'assistant à l'aide de méthodes de traitement du langage naturel. Cette représentation des règles facilite leur compréhension par le concepteur ainsi que leur écriture et modification. Dans le modèle de données de CACDA, la représentation des règles de conception est issue de l'analyse de leur énoncé principal en langage naturel.
- La capture du contexte de conception permet à CACDA de fournir des services adaptés au besoin instantané du concepteur. Une analyse des différents modèles de données

contextuelles disponibles dans la littérature nous a permis de mettre en place un modèle adapté au contexte de conception.

- L'utilisation d'un système de recommandation permet à l'assistant de proposer au concepteur des règles directement applicables à son contexte et donc d'intégrer de façon fluide la recherche et l'application des règles de conception au processus de Conception Assistée par Ordinateur. La méthode de construction du modèle de données de CACDA prend en compte ces exigences fonctionnelles et permet donc d'accéder aux règles de conception à partir d'éléments contextuels.

Cette construction théorique de CACDA est présentée dans le chapitre 3 de ce mémoire.

On peut conclure que les méthodes de construction mises en place pour établir la structure de CACDA permettent d'améliorer la maîtrise des règles de conception et sont également prévues pour permettre à l'assistant de recommander des règles applicables au contexte de conception d'un utilisateur. Les méthodes de construction de CACDA permettent donc de répondre aux exigences.

Validation empirique de la structure

Afin de tester la validité de notre approche, nous avons mis en place un cas d'étude industriel décrit dans la partie 4.1 de ce mémoire.

Ce cas d'étude représente un contexte de conception inspiré de l'industrie aéronautique. Les participants doivent modéliser une pièce issue de la structure mécanique d'un avion, tout en respectant les règles de conception en vigueur dans leur domaine. Ces règles sont issues de manuels de conception d'une grande entreprise du secteur. Sur l'ensemble des règles utilisées dans le cas d'étude, seule une partie est applicable au contexte de conception des participants. Ceux-ci doivent donc identifier les règles applicables afin de limiter les erreurs de conception dans leur modèle.

Ce cas d'étude est conforme au constat présenté dans le contexte de notre étude et à notre état de l'art sur l'utilisation des règles de conception dans l'industrie manufacturière. Il est donc pertinent de tester le fonctionnement d'un démonstrateur de CACDA dans ce cas d'étude.

II. Validation de la performance

Pour évaluer la performance de notre proposition, nous nous pencherons sur les résultats expérimentaux issus du test d'un démonstrateur technique dans notre cas d'étude industriel. Nous évaluerons aussi la généralité de notre proposition au-delà du cas d'étude testé afin de valider théoriquement la performance de notre modèle.

Validation empirique de la performance

Dans le chapitre 5 de ce mémoire, nous avons présenté les expérimentations effectuées dans un cas d'étude industriel avec un démonstrateur technique de CACDA. Notre protocole expérimental nous a permis de comparer l'utilisation classique de manuels de conception avec l'utilisation d'un système de recommandation contextuel de règles de conception.

Les mesures effectuées vont dans le sens d'un impact positif de l'utilisation de notre approche. Elles permettent donc de conclure que les recommandations de règles de l'assistant intelligent améliorent l'efficacité du processus de Conception Assisté par Ordinateur. Cependant, nous avons identifié plusieurs limites à ces tests, qui nous amènent à considérer que des expérimentations supplémentaires sont nécessaires pour pleinement valider la performance de CACDA.

Validation théorique de la performance

Notre validation empirique a été réalisée à l'aide d'un cas d'étude dans le domaine de l'aéronautique et avec l'environnement de CAO 3DEXPERIENCE. Cependant, la construction théorique de CACDA ne dépend pas d'un domaine industriel ou d'un environnement CAO particulier. On peut donc supposer que les conclusions de nos expérimentations s'appliquent dans les autres domaines industriels et avec d'autres environnements de CAO (Figure 62). Cette hypothèse devra être confirmée par un projet pilote préalablement au déploiement de CACDA.

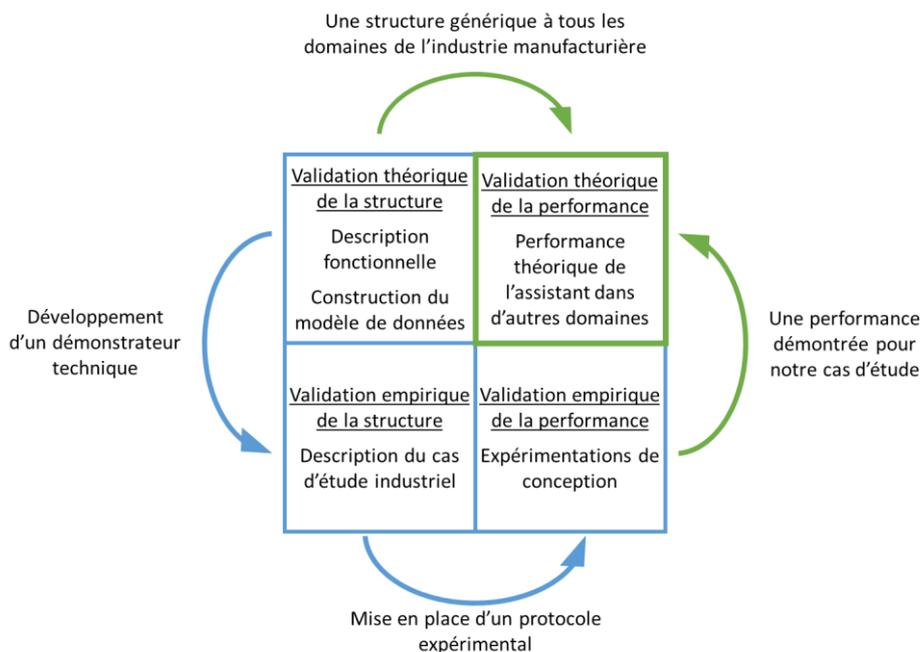


Figure 62 : Validation théorique de la performance

B. Conclusion

La maîtrise des règles de conception est un enjeu majeur pour l'industrie manufacturière. Elles permettent aux concepteurs d'accéder aux connaissances d'experts nécessaires à la conception. Cependant, l'utilisation de manuels de règles en langage naturel rend leur recherche complexe, diminuant ainsi l'efficacité de leur utilisation et augmentant les risques d'erreurs. Par ailleurs, les outils et assistants cognitifs existants dédiés aux règles de conception adoptent une approche centrée sur la CAO. Cette approche ne leur permet pas de traiter l'ensemble des règles existantes. De plus, elle suppose une application a posteriori des règles, qui engendre de nombreux cycles de correction et validation dans le processus de conception.

C'est pourquoi, afin d'améliorer la maîtrise des règles de conception, nous proposons une nouvelle approche centrée sur le concepteur. Ce manuscrit présente la construction et la validation empirique de cette proposition. Il s'articule en cinq chapitres.

Dans l'**introduction**, nous avons présenté le contexte de notre étude. Nous avons notamment fait le constat de la difficulté d'utilisation des règles de conception dans l'industrie manufacturière. Nous en avons déduit la question de recherche à laquelle répondent nos travaux : **Comment améliorer l'efficacité du processus de Conception Assistée par Ordinateur par une meilleure maîtrise des règles de conception ?**

Afin de formuler une hypothèse de recherche, nous avons réalisé un état de l'art, présenté dans le **Chapitre 1**. Cet état de l'art structure les travaux de la littérature scientifique autour des règles de conception. Dans sa première partie, nous revenons en détail sur les définitions, caractéristiques et utilisations des règles de conception. Nous détaillons ensuite la notion d'assistant cognitif afin d'introduire une revue d'aide à l'utilisation des règles de conception. Nous présentons également les différentes représentations numériques des règles de conception utilisées dans ces outils. Faisant le constat de la nécessité d'une approche centrée sur l'utilisateur, la dernière partie de l'état de l'art est consacrée aux différentes technologies permettant de construire cette nouvelle approche.

L'analyse de notre état de l'art nous a permis de poser l'hypothèse de recherche suivante : **des recommandations contextuelles de règles de conception permettent d'améliorer le processus de Conception Assistée par Ordinateur.**

Dans le **Chapitre 2**, nous faisons donc la description théorique complète de cet assistant intelligent, nommé CACDA (*Context-Aware Cognitive Design Assistant*). La première partie est une description fonctionnelle de l'environnement de conception. La deuxième partie présente le modèle de données orienté graphe permettant la mise en œuvre de cet environnement.

Afin de valider empiriquement notre proposition et de répondre à notre question de recherche, nous avons développé un démonstrateur technique de l'environnement de

conception intelligent. Le Chapitre 3 détaille l'implémentation de ce démonstrateur, à savoir la structure logicielle et le développement des services de l'assistant intelligent.

Finalement, le **Chapitre 4** présente la validation expérimentale de notre apport. Pour tester l'impact du démonstrateur sur le processus de conception, nous avons mis en place un protocole expérimental basé sur un cas d'étude industriel. Ce cas d'étude constitue la validation empirique de la structure de l'assistant. Nous avons mis en évidence un impact positif sur le processus de conception ainsi que la faisabilité d'un environnement de conception intelligent. De plus ces expérimentations fixent un précédent pour le développement et le test de nouveaux assistants cognitifs pour l'utilisation des règles de conception.

Nos travaux de thèse ont donc décrit CACDA, un assistant intelligent dédié aux règles de conception de l'industrie manufacturière. Un démonstrateur de cet assistant a été développé et testé. Nos travaux démontrent la nécessité d'une approche centrée sur le concepteur pour améliorer la maîtrise des règles de conception dans l'industrie. Ils ouvrent la voie pour le développement de la prochaine génération d'assistants cognitifs pour la conception.

C. Limites

Cette partie liste les différentes limites de nos travaux.

Limites du modèle de données

Le modèle de données proposé permet de relier des règles en langage naturel au contexte de conception d'un utilisateur. Ce modèle est générique à tous les domaines de l'industrie et aux différents logiciels de CAO existants. Cette généricité implique que le déploiement de l'assistant dans un domaine nécessite un travail d'adaptation de son modèle de données. Le sous-contexte technique est celui nécessitant le plus d'adaptation. La difficulté de la mise en place de ce sous-contexte pour différents domaines n'est pas traitée dans nos travaux. Ainsi, des études préalables au déploiement de CACDA dans un nouveau domaine devront quantifier cette difficulté d'adaptation du modèle de données générique à un cas d'application particulier.

Limites du démonstrateur

Les limites les plus directes à nos travaux proviennent de notre démonstrateur technique. Afin de faciliter son développement et en raison de contraintes expérimentales, le démonstrateur comporte plusieurs limites dans sa représentation de CACDA :

- Pour le premier service, la capture et modélisation des règles de conception, le démonstrateur récupère des règles déjà présélectionnées dans un document semi-structuré. L'état des connaissances dans le domaine de l'identification et de la capture des règles de conception dans des documents non structurés ne permet pas encore de réaliser cette opération. Il y a donc un verrou technologique important au déploiement de CACDA. Cependant, cette limite est amenée à diminuer en importance avec le progrès de la numérisation des entreprises et avec les avancées scientifiques liées à l'analyse de documents non structurés.

- Pour réaliser le deuxième service, la recommandation de règles de conception, notre démonstrateur utilise un système de recommandation basé sur une exploration aléatoire du graphe de connaissances. Il n'est pas évident que ce système soit le plus adapté ou le plus performant pour ce service. Nos travaux nous permettent de démontrer la faisabilité et la pertinence de la recommandation contextuelle de règles de conception. Cependant, un travail de comparaison entre les différentes solutions techniques doit être réalisé pour permettre le déploiement de CACDA. On peut cependant noter que cette limite est au désavantage de notre démonstrateur, ce qui renforce notre confiance dans nos résultats expérimentaux.

- Le troisième service, accompagner le concepteur dans l'application des règles, n'est que peu représenté dans le démonstrateur. Pour des raisons expérimentales, celui-ci ne fait qu'ouvrir l'extrait du manuel de conception correspondant à la règle sélectionnée. En théorie, une interface intégrée dans l'environnement CAO devrait permettre au concepteur de consulter les informations nécessaires à l'application d'une règle. Cette interface est peu détaillée dans nos travaux. Un travail de recherche en interface homme-machine doit être mené avant le déploiement de CACDA. Cette limite est également au désavantage du démonstrateur. On peut supposer qu'une version aboutie de CACDA sera beaucoup plus efficace que le démonstrateur testé dans le cadre de nos travaux.

Limites des expérimentations

Les limites propres à chaque expérimentation ont été discutées lors de l'analyse des résultats de celles-ci dans les parties 4.2.4 et 4.3.4. Cette partie résume et synthétise ces limites.

- Nos panels de participants sont peu nombreux (14 pour les expérimentations de faisabilité) et ne sont pas des concepteurs professionnels. Cette limite est fréquente dans les études liées à la conception. Dans notre cas, les participants de nos expérimentations peuvent être assimilés à des concepteurs débutants.

- Notre cas d'étude comporte également des limites due aux contraintes expérimentales et ne représente donc pas complètement l'activité de Conception Assistée par Ordinateur dans l'industrie. Certaines de ces limites sont cependant au désavantage de notre assistant. Le nombre de règles de conception, plus faible dans notre cas d'étude que dans l'industrie, et l'utilisation d'un seul document au lieu d'une documentation éparpillée, avantage le groupe

contrôle. D'autres limites, comme la durée limitée des expérimentations par rapport à une situation industrielle, impactent de la même façon les deux groupes de participants. On peut donc considérer que ces limites ont un impact limité.

- Les expérimentations ont été réalisées au fil du développement du démonstrateur technique. Ainsi, le sous-contexte social et le sous-contexte numérique n'ont pas été testés. Nos expérimentations ne testent que des recommandations initiées par le concepteur à partir d'une requête. On peut supposer que l'implémentation des derniers sous-contextes et de recommandations automatiques permettrait d'améliorer la performance du démonstrateur.

D. Discussion et perspectives

Nos travaux proposent la mise en place d'un environnement de conception intelligent pour améliorer l'utilisation des règles de conception dans l'industrie manufacturière. Cette étude nous permet d'envisager plusieurs perspectives à court, moyen et long terme.

Perspectives à court terme

La première perspective à court terme est de confirmer nos résultats expérimentaux par de nouveaux tests, réalisés avec un panel de concepteurs professionnels et avec un démonstrateur plus abouti. Par exemple, un travail de pondération des différentes relations du graphe peut être effectué afin d'améliorer la pertinence des recommandations. Il est également possible de réaliser une analyse afin de personnaliser les paramètres du système de recommandation.

Lors de l'implémentation du démonstrateur, nous avons sélectionné des technologies, algorithmes et méthodes adaptés aux services de l'assistant intelligent. Cependant, il existe de nombreuses technologies différentes et potentiellement plus performantes que celles retenues dans ces travaux. Notre travail de thèse ouvre de nombreuses perspectives à court termes dans les domaines sur lesquels s'appuie l'environnement de conception intelligent, à savoir l'analyse du langage naturel, la recommandation de connaissance, l'analyse du contexte et autres. L'analyse des différentes solutions techniques possibles et la sélection des plus performantes est un travail futur nécessaire.

Perspectives à moyen terme

Nos travaux se sont concentrés sur l'utilisation des règles de conception dans l'industrie manufacturière. Cependant, la mise en place d'un graphe de connaissances contextuelles pour la conception permet le développement des autres services envisagés pour l'environnement de conception intelligent. Par exemple, la prédiction et l'automatisation de tâches de conception routinières pourraient être réalisées grâce à une analyse de l'historique contextuel [163]–[165] des concepteurs et grâce à des outils de prédiction du contexte [187].

Des services d'aides et de conseils pour le suivi et la mise à jour des connaissances de l'entreprise peuvent également être envisagés.

A moyen terme, l'une des perspectives est la réalisation d'un projet pilote industriel. En effet, les tests en laboratoire ne peuvent représenter que partiellement la réalité du travail de concepteur en entreprise. Une expérience en conditions réelles et sur un temps plus long est nécessaire avant l'éventuel déploiement de ce nouvel outil. Afin que le projet pilote reste performant malgré les difficultés liées au changement et à l'apprentissage d'un nouvel outil, le logiciel utilisé doit être plus robuste et performant que celui développé dans le cadre de nos travaux. Dans nos travaux, nous nous sommes concentrés sur une méthode unique d'exploration du graphe. Un logiciel professionnel devra certainement avoir recours à plusieurs méthodes selon les situations et à la construction de requêtes directes pour les services les plus routiniers et prévisibles.

Perspectives à long terme

A long terme, l'utilisation d'un environnement de conception intelligent deviendra de plus en plus pertinent. En effet, la complexité de la conception ainsi que le nombre de règles de conception continueront leur croissance avec la découverte de nouvelles technologies, l'apparition de nouveaux défis industriels et de nouveaux besoins. Ainsi la principale perspective à long terme de nos travaux est le développement d'une nouvelle génération d'assistants cognitifs pour la conception.

Il est envisageable d'intégrer ces futurs outils dans les systèmes de gestion de cycle de vie des produits (PLM) déjà largement utilisés dans l'industrie. Comme le montrent les travaux de Lise KIM [30], la représentation des données des entreprises sous forme de graphe est amenée à se développer. L'interconnexion d'un environnement de conception intelligent avec les connaissances pourrait permettre d'améliorer le suivi et la personnalisation des services rendus par l'environnement.

La nature des futurs assistants intelligents pour la conception dépendra fortement des avancées des différents domaines évoqués dans ces travaux, comme le traitement du langage naturel et l'intelligence artificielle. Ces domaines scientifiques étant très dynamiques, il est difficile d'anticiper les futures avancées techniques et encore plus leurs répercussions sur le développement d'assistants cognitifs.

Revues internationales

International Journal on Interactive Design and Manufacturing

Huet, A., Piquié, R., Véron, P., Segonds, F. & Fau, V. (2022). Design Rules Application in Manufacturing Industries: A State of the Art Survey and Proposal of a Context-Aware Approach.

DOI : <https://doi.org/10.1007/s12008-021-00821-w>

Computers in industry

Huet, A., Piquié, R., Véron, P., Mallet, A. & Segonds, F. (2021). CACDA : A knowledge graph for a context-aware cognitive design assistant.

DOI : <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103377>

Advanced Engineering Informatics

Huet, A., Segonds, F., Piquié, R., Véron, P., Guegan, J. & Mallet, A. (2021). Context-aware cognitive design assistant: Implementation and study of design rules recommendations.

DOI : <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101419>

Conférences internationales

IFIP International Conference on Product Lifecycle Management

Huet, A., Piquié, R., Véron, P., Segonds, F. & Fau, V. (2020). Knowledge Graph of Design Rules for a Context-Aware Cognitive Design Assistant.

DOI : <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103377>

International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing

Huet, A., Piquié, R., Véron, P., Segonds, F. & Fau, V. (2020). Design Rules Application in Manufacturing Industries: A State of the Art Survey and Proposal of a Context-Aware Approach.

DOI : http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-70566-4_53

Bibliographie

- [1] D. G. Ullman, *The mechanical design process*, Vol. 2. New York: McGraw-Hill, 1992.
- [2] J.-L. Le Moigne and H. A. Simon, *Sciences des systèmes, sciences de l'artificiel*, Dunod. Paris, 1991.
- [3] J. Stjepandić, N. Wognum, and W. J. C. Verhagen, *Concurrent Engineering in the 21st century*, 1st ed. Springer, Cham, 2015.
- [4] M. Tichem and T. Storm, *Designer support for product structuring—development of a DFX tool within the design coordination framework*, *Comput. Ind.*, vol. 33, no. 2–3, pp. 155–163, Sep. 1997, doi: 10.1016/S0166-3615(97)00021-3.
- [5] D. Walden, G. Roedler, K. Forsberg, D. Hamelin, and T. Shortell, *Systems engineering handbook: a guide for system life cycle processes and activities*, Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.
- [6] F. Segonds, G. Cohen, P. Véron, and J. Peyceré, *PLM and early stages collaboration in interactive design, a case study in the glass industry*, *Int. J. Interact. Des. Manuf.*, vol. 10, no. 2, pp. 95–104, 2016, doi: 10.1007/s12008-014-0217-4.
- [7] A. Alavizadeh and S. K. Jetley, *Usage of axiomatic design methodology in the US industries*, VDM Publishing, 2008.
- [8] U. Lindemann, M. Maurer, and T. Braun, *Complexity in the context of product design*, in *Structural Complexity Management*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2009, pp. 21–42.
- [9] J. Luo and K. L. Wood, *The growing complexity in invention process*, *Res. Eng. Des.*, vol. 28, no. 4, pp. 421–435, 2017, doi: 10.1007/s00163-017-0266-3.
- [10] H. P. Wiendahl and P. Scholtissek, *Management and Control of Complexity in Manufacturing*, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 43, no. 2, pp. 533–540, 1994, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60499-5.
- [11] B. Lawson, K. J. Petersen, P. D. Cousins, and R. B. Handfield, *Knowledge sharing in interorganizational product development teams: The effect of formal and informal socialization mechanisms*, *J. Prod. Innov. Manag.*, vol. 26, no. 2, pp. 156–172, 2009.
- [12] A. Myrodiá, T. Randrup, and L. Hvam, *Configuration lifecycle management maturity model*, *Comput. Ind.*, vol. 106, 2019, doi: 10.1016/j.compind.2018.12.006.
- [13] V. Modrak and S. Bednar, *Entropy Based versus Combinatorial Product Configuration Complexity in Mass Customized Manufacturing*, in *Procedia CIRP*, 2016, vol. 41, doi: 10.1016/j.procir.2015.12.100.
- [14] C. Sassanelli, A. Urbinati, P. Rosa, D. Chiaroni, and S. Terzi, *Addressing circular economy through design for X approaches: A systematic literature review*, *Computers in Industry*, vol. 120. 2020, doi: 10.1016/j.compind.2020.103245.
- [15] Union Européenne, *Platform on Sustainable Finance on preliminary recommendations for technical screening criteria for the EU taxonomy, rapport préliminaire*, 2021. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/business_economy_euro/banking_and_finance/documents/210803-sustainable-finance-platform-report-technical-screening-criteria-taxonomy-annex_en.pdf. [Accessed: 24-Sep-2021].
- [16] M. Schäfer and M. Löwer, *Ecodesign—A Review of Reviews*, *Sustainability*, vol. 13, no. 1, 2021, doi: 10.3390/su13010315.
- [17] H. Kim, F. Cluzel, Y. Leroy, B. Yannou, and G. Yannou-Le Bris, *Research perspectives in ecodesign*, *Des. Sci.*, vol. 6, p. e7, Apr. 2020, doi: 10.1017/dsj.2020.5.
- [18] E. Englehardt, P. H. Werhane, and L. H. Newton, Leadership, *Engineering and Ethical Clashes at Boeing*, *Sci. Eng. Ethics*, vol. 27, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s11948-021-00285-x>.
- [19] K. Segal and R. S. Weinberg, *Total Recall: A Data-Driven Analysis of the Takata Airbag Recall*, Feb. 2019,

doi: 10.1184/R1/7789094.V1.

- [20] F. H. ERGEN KELEŞ, *The impact of product recall message on financial value*, 2019.
- [21] N. G. Rupp, *The Attributes of a Costly Recall: Evidence from the Automotive Industry*, *Rev. Ind. Organ.* 2004 251, vol. 25, no. 1, pp. 21–44, Aug. 2004, doi: 10.1023/B:REIO.0000040514.22968.E1.
- [22] C. Y. Baldwin, K. B. Clark, and K. B. Clark, *Design Rules: The power of modularity*, MIT Press, 2000.
- [23] R. Marques and P. B. Lourenço, *Structural behaviour and design rules of confined masonry walls: Review and proposals*, *Constr. Build. Mater.*, vol. 217, pp. 137–155, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.04.266.
- [24] V. Finazzi *et al.*, *Design Rules for Producing Cardiovascular Stents by Selective Laser Melting: Geometrical Constraints and Opportunities*, *Procedia Struct. Integr.*, vol. 15, pp. 16–23, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROSTR.2019.07.004.
- [25] J. M. Russell, J. Sagaseta, D. Cormie, and A. E. K. Jones, *Historical review of prescriptive design rules for robustness after the collapse of Ronan Point*, *Structures*, vol. 20, pp. 365–373, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2019.04.011.
- [26] R. B. Handfield, S. A. Melnyk, R. J. Calantone, and S. Curkovic, *Integrating environmental concerns into the design process: The gap between theory and practice*, *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 48, no. 2, pp. 189–208, 2001, doi: 10.1109/17.922478.
- [27] N. Ur-Rahman and J. A. Harding, *Textual data mining for industrial knowledge management and text classification: A business oriented approach*, *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 5, pp. 4729–4739, Apr. 2012, doi: 10.1016/J.ESWA.2011.09.124.
- [28] L. Kassner, C. Gröger, B. Mitschang, and E. Westkämper, *Product Life Cycle Analytics – Next Generation Data Analytics on Structured and Unstructured Data*, *Procedia CIRP*, vol. 33, pp. 35–40, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.PROCIR.2015.06.008.
- [29] D. R. G. Rydning, *The digitization of the world from edge to core*, *Fram. Int. Data Corp.*, p. 16, 2018.
- [30] L. KIM, *Proposition d’un système de recherche d’information dans un environnement numérique distribué et hétérogène : application à l’industrie manufacturière*, École Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, 2021.
- [31] J.-P. Nadeau and X. Fischer, *Research in interactive design (Vol. 3): virtual, interactive and integrated product design and manufacturing for industrial innovation*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [32] G. Tecuci, D. Marcu, M. Boicu, and D. A. Schum, *Knowledge engineering: building cognitive assistant for evidence-based reasoning*, Cambridge, 2016.
- [33] J. Durkin, *Expert Systems: Design & Development in Macmillan*, 1994.
- [34] F. O. Flemisch and R. Onken, *The Cognitive Assistant System and its contribution to effective man/machine interaction*, *Proc. Appl. Inf. Technol. (Computer Sci. to Mission Syst.*, no. April, pp. 18/1–12, 1998.
- [35] M. Causse *et al.*, *The 1st International Conference on Cognitive Aircraft Systems–ICCAS*, 2020.
- [36] M. Nowak and J. Szewczyk, *Expert Systems In Medecine*, *B. Artic.*, p. 84, 2021.
- [37] A. Sheikhtaheri, F. Sadoughi, and Z. Hashemi Dehaghi, *Developing and Using Expert Systems and Neural Networks in Medicine: A Review on Benefits and Challenges*, *J. Med. Syst.*, vol. 38, no. 9, p. 110, 2014, doi: 10.1007/s10916-014-0110-5.
- [38] H. J. Watson and R. I. Mann, *Expert Systems: Past, Present, and Future*, <http://dx.doi.org/10.1080/07399018808962939>, vol. 5, no. 4, pp. 39–46, 1988, doi: 10.1080/07399018808962939.
- [39] J. Durkin, *Expert Systems: A View of the Field*, *IEEE Intell. Syst.*, vol. 11, no. 02, pp. 56–63, Mar. 1996, doi:

10.1109/64.491282.

- [40] P. H. De Vries and P. F. De Vries Robbe, **An overview of medical expert systems**, *Methods Inf. Med.*, vol. 24, no. 2, pp. 57–64, Feb. 1985, doi: 10.1055/S-0038-1635358/ID/BR1635358-26.
- [41] M. Ishizuka, **Expert systems**, *Shisutemu To Seigyo*, vol. 10, 1982.
- [42] M. Perkusich *et al.*, **Intelligent software engineering in the context of agile software development: A systematic literature review**, *Inf. Softw. Technol.*, vol. 119, p. 106241, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.INFSOF.2019.106241.
- [43] R. Pinqüié, **Proposition d'un environnement numérique dédié à la fouille et à la synthèse collaborative d'exigences en ingénierie de produits**, 2016.
- [44] J. D. Kelleher and B. Tierney, **Data science**, MIT Press, 2018.
- [45] R. Ackoff, **From data to wisdom**, *J. Appl. Syst. Anal.*, 1989.
- [46] P. Cooper, **Data, information, knowledge and wisdom**, *Anaesth. Intensive Care Med.*, vol. 18, no. 1, pp. 55–56, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.MPAIC.2016.10.006.
- [47] J. Rowley, **The wisdom hierarchy: representations of the DIKW hierarchy**, <http://dx.doi.org/10.1177/0165551506070706>, vol. 33, no. 2, pp. 163–180, Feb. 2007, doi: 10.1177/0165551506070706.
- [48] R. Nelson, **Informatics: Evolution of the Nelson Data, Information, Knowledge and Wisdom Model: Part 2**, *OJIN Online J. Issues Nurs.*, vol. 25, no. 3, Jul. 2020, doi: 10.3912/OJIN.VOL25NO03INFOCOL01.
- [49] M. Lenz, B. Bartsch-Spörl, H.-D. Burkhard, and S. Wess, **Case-based reasoning technology: from foundations to applications**, vol. 1400. Springer, 2003.
- [50] J. Kolodner, **Case-based reasoning**, Morgan Kaufmann, 2014.
- [51] N. T. Le and L. Wartschinski, **A Cognitive Assistant for improving human reasoning skills**, *Int. J. Hum. Comput. Stud.*, vol. 117, pp. 45–54, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.IJHCS.2018.02.005.
- [52] A. M. Madni, **Exploiting Augmented Intelligence in Systems Engineering and Engineered Systems**, *Insight*, vol. 23, no. 1, pp. 31–36, 2020, doi: 10.1002/inst.12282.
- [53] GuidottiRiccardo, MonrealeAnna, RuggieriSalvatore, TuriniFranco, GiannottiFosca, and PedreschiDino, **A Survey of Methods for Explaining Black Box Models**, *ACM Comput. Surv.*, vol. 51, no. 5, Aug. 2018, doi: 10.1145/3236009.
- [54] R. Guidotti, A. Monreale, S. Ruggieri, D. Pedreschi, F. Turini, and F. Giannotti, **Local Rule-Based Explanations of Black Box Decision Systems**, May 2018.
- [55] Q. Zhao and T. Hastie, **Causal Interpretations of Black-Box Models**, <https://doi.org/10.1080/07350015.2019.1624293>, vol. 39, no. 1, pp. 272–281, 2019, doi: 10.1080/07350015.2019.1624293.
- [56] I. Tiddi, F. Lécué, and P. Hitzler, **Knowledge Graphs for Explainable Artificial Intelligence: Foundations, Applications and Challenges**, vol. 47. IOS Press, 2020.
- [57] R. Confalonieri, L. Coba, B. Wagner, and T. R. Besold, **A historical perspective of explainable Artificial Intelligence**, *Wiley Interdiscip. Rev. Data Min. Knowl. Discov.*, vol. 11, no. 1, Jan. 2021, doi: 10.1002/WIDM.1391.
- [58] W. Swartout, C. Paris, and J. Moore, **Explanations in knowledge systems: design for explainable expert systems**, *IEEE Expert*, vol. 6, no. 3, pp. 58–64, 1991, doi: 10.1109/64.87686.
- [59] F. Holzmann, **Needs of improved assistant systems**, *Adapt. Coop. between Driv. Assist. Syst.*, pp. 3–10, Dec. 2008, doi: 10.1007/978-3-540-74474-0_1.
- [60] R. Sabatini *et al.*, **A Virtual Pilot Assistant System for Single Pilot Operations of Commercial Transport**

Aircraft, 2017.

- [61] C. Torens, F. Juenger, S. Schirmer, S. Schopferer, T. D. Maienschein, and J. C. Dauer, **Machine Learning Verification and Safety for Unmanned Aircraft - A Literature Study**, *AIAA SCITECH 2022 Forum*, Jan. 2022, doi: 10.2514/6.2022-1133.
- [62] R. Cowan, **Expert systems: aspects of and limitations to the codifiability of knowledge**, *Res. Policy*, vol. 30, no. 9, pp. 1355–1372, Dec. 2001, doi: 10.1016/S0048-7333(01)00156-1.
- [63] R. Klein, **Knowledge modeling in design - the MOKA framework**, pp. 77–102, 2000.
- [64] J. Dimiyadi and R. Amor, **Engineering Knowledge Extraction for Semantic Interoperability Between CAD, KBE and PLM Systems**, *IFIP Adv. Inf. Commun. Technol.*, vol. 517, pp. 324–334, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-72905-3.
- [65] K. K. Fu, M. C. Yang, and K. L. Wood, **Design Principles: Literature Review, Analysis, and Future Directions**, *J. Mech. Des.*, vol. 138, no. 10, Aug. 2016, doi: 10.1115/1.4034105.
- [66] D. E. Calkins, N. Egging, and C. Scholz, **Knowledge-Based Engineering (KBE) Design Methodology at the Undergraduate and Graduate Levels**, *Int. J. Eng. Educ.*, vol. 16, no. 1, pp. 21–38, 2000.
- [67] R. Wever, **Design for volume optimization of packaging for durable goods**, *Packag. Technol. Sci.*, vol. 24, no. 4, pp. 211–222, 2011.
- [68] D. Mourtzis, P. Papathanasiou, and S. Fotia, **Lean Rules Identification and Classification for Manufacturing Industry**, *Procedia CIRP*, vol. 50, pp. 198–203, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.PROCIR.2016.04.097.
- [69] C. A. McMahon, D. J. Pitt, Y. Yang, and J. H. Sims Williams, **Review: An information management system for informal design data**, *Eng. Comput.*, vol. 11, no. 3, pp. 123–135, 1995, doi: 10.1007/BF01271278.
- [70] W. H. Wood, M. C. Yang, M. R. Cutkosky, and A. M. Agogino, **Design Information Retrieval: Improving Access to the Informal Side of Design**, *ASME 1998 Design Engineering Technical Conferences*. 13-Sep-1998, doi: 10.1115/DETC98/DTM-5665.
- [71] M. C. Yang, W. H. Wood, and M. R. Cutkosky, **Design information retrieval: a thesauri-based approach for reuse of informal design information**, *Eng. Comput.*, vol. 21, no. 2, pp. 177–192, 2005, doi: 10.1007/s00366-005-0003-9.
- [72] S. Myung and S. Han, **Knowledge-based parametric design of mechanical products based on configuration design method**, *Expert Syst. Appl.*, vol. 21, no. 2, pp. 99–107, 2001, doi: 10.1016/S0957-4174(01)00030-6.
- [73] B. Huang, C. Xu, R. Huang, and S. Zhang, **An automatic 3D CAD model errors detection method of aircraft structural part for NC machining**, *J. Comput. Des. Eng.*, vol. 2, no. 4, pp. 253–260, 2015, doi: 10.1016/j.jcde.2015.06.008.
- [74] W. J. C. Verhagen, P. Bermell-Garcia, R. E. C. Van Dijk, and R. Curran, **A critical review of Knowledge-Based Engineering: An identification of research challenges**, *Adv. Eng. Informatics*, vol. 26, no. 1, pp. 5–15, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.AEI.2011.06.004.
- [75] E. J. Reddy, C. N. V. Sridhar, and V. P. Rangadu, **Knowledge Based Engineering: Notion, Approaches and Future Trends**, *Am. J. Intell. Syst.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–17, 2015, doi: 10.5923/j.ajis.20150501.01.
- [76] **DFMPro**, [Online]. Available: <https://dfmpro.geometricglobal.com/>.
- [77] **Siemens NX Checkmate**, [Online]. Available: https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/Images/2504_tcm1023-11882.pdf.
- [78] A. Elkaseer, T. Mueller, A. Charles, and S. Scholz, **Digital Detection and Correction of Errors in As-built Parts: a Step Towards Automated Quality Control of Additive Manufacturing**, pp. 389–392, 2018, doi: 10.3850/978-981-11-2728-1_58.

- [79] W. Naheman and J. Wei, **Review of NoSQL databases and performance testing on HBase**, in *Proceedings 2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC)*, 2013, pp. 2304–2309.
- [80] A. Haseeb and G. Pattun, **A review on NoSQL: Applications and challenges**, *Int. J. Adv. Res. Comput. Sci.*, vol. 8, no. 1, 2017.
- [81] J. F. Sowa, **Principles of semantic networks: Explorations in the representation of knowledge**, Morgan Kaufmann, 2014.
- [82] S. Ji, S. Pan, E. Cambria, P. Marttinen, and P. S. Yu, **A survey on knowledge graphs: Representation, acquisition and applications**, *arXiv*, pp. 1–27, 2020, doi: 10.1109/TNNLS.2021.3070843.
- [83] L. Strobini and A. Niewiadomski, **Recommendations and object discovery in graph databases using path semantic analysis**, *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 8467 LNAI, no. PART 1, pp. 793–804, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-07173-2_68.
- [84] R. Angles, **The property graph database model**, in *Proceedings of the 12th Alberto Mendelzon International Workshop on Foundations of Data Management*, 2018, vol. 2100, no. Section 2.
- [85] W. Ehrlinger, L., & Wöß, **Towards a Definition of Knowledge Graphs**, *Semant. (Posters, Demos, SuCESS)*, vol. 48, pp. 1–4, 2016.
- [86] P. W. Witherell, **Semantic methods for intelligent distributed design environments**, no. September, 2009.
- [87] G. Ducellier, **Gestion de règles expertes en ingénierie collaborative : application aux plateformes PLM**, Université de Technologie de Troyes, France, 2008.
- [88] J. Johansson, M. Contero, P. Company, and F. Elgh, **Supporting connectivism in knowledge based engineering with graph theory, filtering techniques and model quality assurance**, *Adv. Eng. Informatics*, vol. 38, no. July, pp. 252–263, 2018, doi: 10.1016/j.aei.2018.07.005.
- [89] M. Bajaj and T. Hedberg, **System Lifecycle Handler - Spinning a Digital Thread for Manufacturing**, *INCOSE Int. Symp.*, vol. 28, no. 1, pp. 1636–1650, 2018, doi: 10.1002/j.2334-5837.2018.00573.x.
- [90] T. D. Hedberg, Jr., B. Manas, and J. A. Camelio, **Using graphs to link data across the product lifecycle for enabling smart manufacturing digital threads**, *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 20, no. 1, 2020.
- [91] Z. Li, X. Zhou, W. M. Wang, G. Huang, Z. Tian, and S. Huang, **An ontology-based product design framework for manufacturability verification and knowledge reuse**, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018 999, vol. 99, no. 9, pp. 2121–2135, May 2018, doi: 10.1007/S00170-018-2099-2.
- [92] Q. Wang and X. Yu, **Ontology based automatic feature recognition framework**, *Computers in Industry*, vol. 65, no. 7, pp. 1041–1052, 2014, doi: 10.1016/j.compind.2014.04.004.
- [93] O. Lassila and R. R. Swick, **Resource description framework (RDF) model and syntax specification**, 1998.
- [94] J. Pérez, M. Arenas, and C. Gutierrez, **Semantics and complexity of SPARQL**, *ACM Trans. Database Syst.*, vol. 34, no. 3, pp. 1–45, 2009.
- [95] D. L. McGuinness and F. Van Harmelen, **OWL web ontology language overview**, *W3C Recomm.*, vol. 10, no. 10, p. 2004, 2004.
- [96] I. Horrocks, P. F. Patel-Schneider, H. Boley, S. Tabet, B. Grosz, and M. Dean, **SWRL: A semantic web rule language combining OWL and RuleML**, *W3C Memb. Submiss.*, vol. 21, no. 79, pp. 1–31, 2004.
- [97] F. Gong, Y. Maid, W. Gong, X. Li, C. Liid, and X. Yuan, **Neo4j graph database realizes efficient storage performance of oilfield ontology**, 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0207595.
- [98] N. Francis *et al.*, **Cypher: An evolving query language for property graphs**, in *Proceedings of the 2018 International Conference on Management of Data*, 2018, pp. 1433–1445.
- [99] A. Rangarajan, P. Radhakrishnan, A. Moitra, A. Crapo, and D. Robinson, **Manufacturability Analysis and**

Design Feedback System Developed Using Semantic Framework, pp. 1–11, 2013.

- [100] M. Dinar and D. W. Rosen, **A design for additive manufacturing ontology**, *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 17, no. 2, pp. 1–9, 2017, doi: 10.1115/1.4035787.
- [101] V. Fortineau, L. L. Sidney, T. Paviot, X. Fiorentini, and S. Lamouri, **Expressing formal rules within ontology-based models using SWRL: an application to the nuclear industry**, *Int. J. Prod. Lifecycle Manag.*, vol. 7, no. 1, p. 75, 2014, doi: 10.1504/ijplm.2014.065458.
- [102] A. Abadi, H. Ben-Azza, and S. Sekkat, **Improving integrated product design using SWRL rules expression and ontology-based reasoning**, *Procedia Comput. Sci.*, vol. 127, pp. 416–425, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.PROCS.2018.01.139.
- [103] K. Y. Kim, D. G. Manley, and H. Yang, **Ontology-based assembly design and information sharing for collaborative product development**, *Comput. Des.*, vol. 38, no. 12, pp. 1233–1250, Dec. 2006, doi: 10.1016/J.CAD.2006.08.004.
- [104] A. Moitra and R. Palla, **Automated Capture and Execution of Manufacturability Rules Using Inductive Logic Programming**, *Proc. 30th Conf. Artif. Intell. (AAAI 2016)*, pp. 4028–4034, 2016.
- [105] G. G. Chowdhury, **Natural language processing**, *Annu. Rev. Inf. Sci. Technol.*, vol. 37, no. 1, pp. 51–89, 2003.
- [106] P. Shi, F. Chen, L. Han, J. Childs, **A Data-Driven Text Mining and Semantic Network Analysis for Design Information Retrieval**, *J. Mech. Des.*, vol. 139, no. 11, 2017, doi: 10.1115/1.4037649.
- [107] S. K. Kang et al., **Extraction of manufacturing rules from unstructured text using a semantic framework**, in *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 2015, vol. 1B, doi: 10.1115/DETC2015-47556.
- [108] W. Yang, C. Fu, X. Yan, and Z. Chen, **A knowledge-based system for quality analysis in model-based design**, *J. Intell. Manuf.*, vol. 31, no. 6, pp. 1579–1606, 2020, doi: 10.1007/s10845-020-01535-8.
- [109] J. Luttmmer, D. Ehring, R. Pluhnau, and A. Nagarajah, **Representation and Application of Digital Standards Using Knowledge Graphs**, *Proc. Des. Soc.*, vol. 1, no. AUGUST, pp. 2551–2560, 2021, doi: 10.1017/pds.2021.516.
- [110] W. Yang, Q. Zhao, X. Yan, and Z. Chen, **A system framework of model quality analysis for product model in collaborative manufacturing**, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07622-1>.
- [111] S. G. Kim, S. M. Yoon, M. Yang, J. Choi, H. Akay, and E. Burnell, **AI for design: Virtual design assistant**, *CIRP Ann.*, vol. 68, no. 1, pp. 141–144, 2019, doi: 10.1016/j.cirp.2019.03.024.
- [112] S. K. Kang et al., **Extraction of Formal Manufacturing Rules from Unstructured English Text**, *Comput. Des.*, vol. 134, p. 102990, May 2021, doi: 10.1016/J.CAD.2021.102990.
- [113] X. Ye and Y. Lu, **Automatic extraction of engineering rules from unstructured text: A natural language processing approach**, *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 20, no. 3, pp. 1–4, 2020, doi: 10.1115/1.4046333.
- [114] A. Boufrida and Z. Boufaïda, **Rule extraction from scientific texts: Evaluation in the specialty of gynecology**, *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, 2020, doi: 10.1016/j.jksuci.2020.05.008.
- [115] S. Kang et al., **Ontology-Based Ambiguity Resolution of Manufacturing Text for Formal Rule Extraction**, *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 19, no. 2, pp. 1–9, 2019, doi: 10.1115/1.4042104.
- [116] C. González-Lluch, P. Company, M. Contero, J. D. Camba, and R. Plumed, **A survey on 3D CAD model quality assurance and testing tools**, *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 83, pp. 64–79, 2017, doi: 10.1016/j.cad.2016.10.003.
- [117] T. Baines, H. Lightfoot, G. M. Williams, and R. Greenough, **State-of-the-art in lean design engineering: a literature review on white collar lean**, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 220, no. 9, pp. 1539–1547, 2006.

- [118] M. Weiser, *The Computer for the 21 st Century*, *Sci. Am.*, vol. 265, no. 3, pp. 94–105, 1991.
- [119] T. Kindberg and A. Fox, *System software for ubiquitous computing*, *IEEE pervasive Comput.*, vol. 1, no. 1, pp. 70–81, 2002.
- [120] H. J. Kim, J. K. Choi, and Y. G. Ji, *Usability evaluation framework for ubiquitous computing device*, *Proc. - 3rd Int. Conf. Converg. Hybrid Inf. Technol. ICCIT 2008*, vol. 1, pp. 164–170, 2008, doi: 10.1109/ICCIT.2008.265.
- [121] J. Krumm, *Ubiquitous computing fundamentals*, CRC Press, 2018.
- [122] M. A. Dhuieb, F. Laroche, and A. Bernard, *Context-awareness: A Key Enabler for Ubiquitous Access to Manufacturing Knowledge*, *Procedia CIRP*, vol. 41, pp. 484–489, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2015.12.027.
- [123] T. K. L. Hui and R. S. Sherratt, *Towards disappearing user interfaces for ubiquitous computing: human enhancement from sixth sense to super senses*, *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 8, no. 3, pp. 449–465, 2017.
- [124] S. van Engelenburg, M. Janssen, and B. Klievink, *Designing context-aware systems: A method for understanding and analysing context in practice*, *J. Log. Algebr. Methods Program.*, vol. 103, pp. 79–104, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.jlamp.2018.11.003.
- [125] A. K. Dey, *Understanding and using context*, *Pers. ubiquitous Comput.*, vol. 5, no. 1, pp. 4–7, 2001, doi: 10.1016/j.healthplace.2012.01.006.
- [126] J. Cassens and A. Kofod-Petersen, *Using activity theory to model context awareness: A qualitative case study*, *FLAIRS Conf.*, pp. 619–624, 2006.
- [127] S. van Engelenburg, M. Janssen, and B. Klievink, *Designing context-aware systems: A method for understanding and analysing context in practice*, *J. Log. Algebr. Methods Program.*, 2019, doi: 10.1016/j.jlamp.2018.11.003.
- [128] G. D. Abowd, A. K. Dey, P. J. Brown, N. Davies, M. Smith, and P. Steggle, *Towards a Better Understanding of Context and Context-Awareness*, 1999, pp. 304–307.
- [129] K. Alexopoulos, S. Makris, V. Xanthakis, K. Sipsas, and G. Chryssolouris, *A concept for context-aware computing in manufacturing: the white goods case*, *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 29, no. 8, pp. 839–849, Aug. 2016, doi: 10.1080/0951192X.2015.1130257.
- [130] M. Baldauf, S. Dustdar, and F. Rosenberg, *A survey on context-aware systems*, *Int. J. Ad Hoc Ubiquitous Comput.*, vol. 2, no. 4, pp. 263–277, 2007, doi: 10.1504/IJAHUC.2007.014070.
- [131] M. Melucci, *A basis for information retrieval in context*, *ACM Trans. Inf. Syst.*, vol. 26, no. 3, 2008, doi: 10.1145/1361684.1361687.
- [132] I. Ruthven, *Information retrieval in context*, in *Advanced Topics in Information Retrieval. The Information Retrieval Series*, Springer., M. Melucci and R. Baeza-Yates, Eds. Berlin, Heidelberg., 2011.
- [133] M. A. Dhuieb, F. Laroche, and A. Bernard, *Context-awareness: A Key Enabler for Ubiquitous Access to Manufacturing Knowledge*, *Procedia CIRP*, vol. 41, pp. 484–489, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2015.12.027.
- [134] M. Peruzzini and M. Pellicciari, *A framework to design a human-centred adaptive manufacturing system for aging workers*, *Adv. Eng. Informatics*, vol. 33, pp. 330–349, 2017, doi: 10.1016/j.aei.2017.02.003.
- [135] J. Zhu, S. K. Ong, and A. Y. C. Nee, *A context-aware augmented reality system to assist the maintenance operators*, *Int. J. Interact. Des. Manuf.*, vol. 8, no. 4, pp. 293–304, 2014, doi: 10.1007/s12008-013-0199-7.
- [136] K. Alexopoulos, S. Makris, V. Xanthakis, K. Sipsas, and G. Chryssolouris, *A concept for context-aware computing in manufacturing: the white goods case*, *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 29, no. 8, pp. 839–849, 2016, doi: 10.1080/0951192X.2015.1130257.

- [137] B. Rowson, H., Bricogne, M., Roucoules, L., Durupt, A., & Eynard, **Knowledge capture and reuse through expert 's activity monitoring in engineering design**, *PLM Conf. (Torino, Italy)*, pp. 621–630, 2018.
- [138] T. D. C. Mattos, F. M. Santoro, K. Revoredo, and V. T. Nunes, **A formal representation for context-aware business processes**, *Comput. Ind.*, vol. 65, no. 8, pp. 1193–1214, 2014, doi: 10.1016/j.compind.2014.07.005.
- [139] T. Gu, X. H. Wang, H. . Pung, and D. Q. Zhang, **An ontology based context model in Intelligent environments**, in *Proceedings of Communication Networks and Distributed Systems Modeling and Simulation Conference*, 2004.
- [140] A. Hasanov, T. H. Laine, and T. S. Chung, **A survey of adaptive context-aware learning environments**, *J. Ambient Intell. Smart Environ.*, vol. 11, no. 5, pp. 403–428, 2019, doi: 10.3233/AIS-190534.
- [141] L. Tamine-Lechani, M. Boughanem, and M. Daoud, **Evaluation of contextual information retrieval effectiveness: overview of issues and research**, *Knowl. Inf. Syst.*, vol. 24, no. 1, pp. 1–34, 2010, doi: 10.1007/s10115-009-0231-1.
- [142] P. Ingwersen, **Context in information interaction – revisited**, in *ProLISSA 2006: Proceedings of the Fourth Biennial DISSAnet Conference. Farm Inn, Pretoria, 2-3 November.*, 2006, pp. 13–23.
- [143] A. Kofod-Petersen and A. Aamodt, **Case-based situation assessment in a mobile context-aware system**, *Artif. Intell. Mob. Syst.*, pp. 41–49, 2003.
- [144] Z. A. Merrouni, B. Frikh, and B. Ouhbi, **Toward Contextual Information Retrieval: A Review and Trends**, *Procedia Comput. Sci.*, vol. 148, pp. 191–200, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.01.036.
- [145] K. Arora, **Recommendation Systems: a Review Report**, *Int. J. Adv. Res. Comput. Sci.*, vol. 8, no. 7, pp. 503–507, 2017, doi: 10.26483/ijarcs.v8i7.4308.
- [146] D. Asanov, **Algorithms and Methods in Recommender Systems**, Berlin, 2011.
- [147] X. Cai et al., **Learning collaborative filtering and its application to people to people recommendation in social networks**, *Proc. - IEEE Int. Conf. Data Mining, ICDM*, pp. 743–748, 2010, doi: 10.1109/ICDM.2010.159.
- [148] V. Subramaniaswamy, R. Logesh, M. Chandrashekhar, A. Challa, and V. Vijayakumar, **A personalised movie recommendation system based on collaborative filtering**, *Int. J. High Perform. Comput. Netw.*, vol. 10, no. 1–2, pp. 54–63, 2017, doi: 10.1504/IJHPCN.2017.083199.
- [149] S. Sawant, **Collaborative Filtering using Weighted BiPartite Graph Projection - A Recommendation System for Yelp**, *Proc. CS224W Soc. Inf. Netw. Anal. Conf.*, 2013.
- [150] X. Wang, R. Wang, C. Shi, G. Song, and Q. Li, **Multi-component graph convolutional collaborative filtering**, in *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2020, vol. 34, no. 04, pp. 6267–6274.
- [151] X. Su and T. M. Khoshgoftaar, **A Survey of Collaborative Filtering Techniques**, *Adv. Artif. Intell.*, vol. 2009, no. Section 3, pp. 1–19, 2009, doi: 10.1155/2009/421425.
- [152] Z. Huang, X. Lu, and H. Duan, **Context-aware recommendation using rough set model and collaborative filtering**, *Artif. Intell. Rev.*, vol. 35, no. 1, pp. 85–99, 2011, doi: 10.1007/s10462-010-9185-7.
- [153] M. J. Pazzani and D. Billsus, **Content-based recommendation systems**, in *The Adaptive Web. Lecture Notes in Computer Science*, Springer., vol. 4321 LNCS, N. W. Brusilovsky P., Kobsa A., Ed. Berlin, Heidelberg., 2007, pp. 325–341.
- [154] F. Rahutomo, T. Kitasuka, and M. Aritsugi, **Semantic Cosine Similarity**, *Semant. Sch.*, vol. 2, no. 4, pp. 4–5, 2012.
- [155] M. Dehmer, **Structural analysis of complex networks**, *Struct. Anal. Complex Networks*, pp. 1–486, 2011, doi: 10.1007/978-0-8176-4789-6.

- [156] J. Leal, V. Rodrigues, and R. Queirós, **Computing semantic relatedness using DBPedia**, *Symp. Lang. Appl. Technol. 1st*, no. January 2014, pp. 133–147, 2012, doi: 10.4230/OASlcs.SLATE.2012.i.
- [157] J. W. G. Putra and T. Tokunaga, **Evaluating text coherence based on semantic similarity graph**, *Proc. TextGraphs@ACL 2017 11th Work. Graph-Based Methods Nat. Lang. Process.*, pp. 76–85, 2020, doi: 10.18653/v1/w17-2410.
- [158] M. A. Alvarez and S. J. Lim, **A graph modeling of semantic similarity between words**, *ICSC 2007 Int. Conf. Semant. Comput.*, pp. 355–362, 2007, doi: 10.1109/ICSC.2007.23.
- [159] I. Gurevych, **Using the structure of a conceptual network in computing semantic relatedness**, *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 3651 LNAI, pp. 767–778, 2005, doi: 10.1007/11562214_67.
- [160] T. Bogers, **Movie Recommendation using Random Walks over the Contextual Graph**, *Proc. 2nd Work. Context. Recomm. Syst. ACM*, no. 2010, 2010.
- [161] C. C. Seepersad, K. Pedersen, J. Emblemsvåg, R. Bailey, J. K. Allen, and F. Mistree, **The Validation Square: How does one verify and validate a design method?**, *Decis. Mak. Eng. Des.*, 2006.
- [162] H. Yoshikawa, **Systematization of Design Knowledge**, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 42, no. 1, pp. 131–134, 1993, doi: 10.1016/S0007-8506(07)62409-3.
- [163] D. Dupont, J. L. V. Barbosa, and B. M. Alves, **CHSPAM: a multi-domain model for sequential pattern discovery and monitoring in contexts histories**, *Pattern Anal. Appl.*, vol. 23, no. 2, pp. 725–734, 2020, doi: 10.1007/s10044-019-00829-9.
- [164] J. H. Rosa, J. L. V. Barbosa, M. Kich, and L. Brito, **A Multi-Temporal Context-aware System for Competences Management**, *Int. J. Artif. Intell. Educ.*, vol. 25, no. 4, pp. 455–492, 2015, doi: 10.1007/s40593-015-0047-y.
- [165] A. S. Filippetto, R. Lima, and J. L. V. Barbosa, **A risk prediction model for software project management based on similarity analysis of context histories**, *Inf. Softw. Technol.*, vol. 131, no. December 2020, 2021, doi: 10.1016/j.infsof.2020.106497.
- [166] K. Goher, E. Shehab, and A. Al-Ashaab, **Model-Based Definition and Enterprise: State-of-the-art and future trends**, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, 2020, doi: 10.1177/0954405420971087.
- [167] I. H. Witten, **Text Mining**, 2004.
- [168] S. B. Roy, H. Wang, U. Nambiar, G. Das, and M. Mohania, **DynaCet: Building dynamic faceted search systems over databases**, *Proc. - Int. Conf. Data Eng.*, pp. 1463–1466, 2009, doi: 10.1109/ICDE.2009.117.
- [169] O. Ben-Yitzhak et al., **Beyond basic faceted search**, *WSDM'08 - Proc. 2008 Int. Conf. Web Search Data Min.*, pp. 33–43, 2008, doi: 10.1145/1341531.1341539.
- [170] J. D. Camba, M. Contero, P. Company, and D. Pérez, **On the integration of model-based feature information in Product Lifecycle Management systems**, *Int. J. Inf. Manage.*, vol. 37, no. 6, pp. 611–621, 2017, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2017.06.002.
- [171] M. A. Dhuieb, F. Laroche, F. Belkadi, and A. Bernard, **Activity theory based context model: Application for enterprise intelligent assistant systems**, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 28, no. 3, pp. 834–839, 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.187.
- [172] P. Shrestha, **Corpus-Based methods for Short Text Similarity**, in *Rencontre des Étudiants Chercheurs en Informatique pour le Traitement automatique des Langues*, 2011.
- [173] K. Abdalgader, **Word Sense Identification Improves the Measurement of Short-Text Similarity**, *Proc. Int. Conf. Comput. Technol. Inf. Manag. (ICCTIM 2014)*, pp. 233–243, 2014, doi: 10.1007/978-3-642-17432-2_44.
- [174] R. Pinqüié, P. Véron, F. Segonds, and N. Croué, **A requirement mining framework to support complex sub-systems suppliers**, *Procedia CIRP*, vol. 70, pp. 410–415, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.03.228.

- [175] A. Huet, R. Pinquié, P. Véron, A. Mallet, and F. Segonds, **CACDA : A knowledge graph for a context-aware cognitive design assistant**, *Comput. Ind.*, vol. 125, 2021, doi: 10.1016/j.compind.2020.103377.
- [176] A. Huet, F. Segonds, R. Pinquié, P. Véron, J. Guegan, and A. Mallet, **Context-aware cognitive design assistant: Implementation and study of design rules recommendations**, *Adv. Eng. Informatics*, vol. 50, p. 101419, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.AEI.2021.101419.
- [177] K. Zuva and T. Zuva, **Evaluation of information retrieval systems**, *Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol.*, vol. 4, no. 3, p. 35, 2012.
- [178] S. G. Hart, **NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later**, *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc.*, pp. 904–908, 2006, doi: 10.1177/154193120605000909.
- [179] C. Nikulin, G. Lopez, E. Piñonez, L. Gonzalez, and P. Zapata, **NASA-TLX for predictability and measurability of instructional design models: case study in design methods**, *Educ. Technol. Res. Dev.*, vol. 67, no. 2, pp. 467–493, 2019, doi: 10.1007/s11423-019-09657-4.
- [180] S. J. Grigg, S. K. Garrett, and L. C. Benson, **Using the NASA-TLX to assess first year engineering problem difficulty**, *62nd IIE Annu. Conf. Expo 2012*, pp. 2793–2802, 2012.
- [181] J. Nielsen and R. Molich, “Heuristic evaluation of user interfaces,” *Conf. Hum. Factors Comput. Syst. - Proc.*, pp. 249–256, Mar. 1990, doi: 10.1145/97243.97281.
- [182] B. Shackel, **Usability – Context, framework, definition, design and evaluation**, *Interact. Comput.*, vol. 21, no. 5–6, pp. 339–346, Dec. 2009, doi: 10.1016/J.INTCOM.2009.04.007.
- [183] J. Nielsen, **Usability engineering**, 1994. .
- [184] K. Fradette, H. J. Keselman, L. Lix, J. Algina, and R. R. Wilcox, **Conventional and robust paired and independent-samples t tests: Type I error and power rates**, *J. Mod. Appl. Stat. Methods*, vol. 2, no. 2, p. 22, 2003.
- [185] S. Khan and M. J. Awan, **A generative design technique for exploring shape variations**, *Adv. Eng. Informatics*, vol. 38, no. March, pp. 712–724, 2018, doi: 10.1016/j.aei.2018.10.005.
- [186] B. Alper, N. H. Riche, G. Ramos, and M. Czerwinski, **Design study of linesets, a novel set visualization technique**, *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 17, no. 12, pp. 2259–2267, 2011, doi: 10.1109/TVCG.2011.186.
- [187] J. H. Da Rosa, J. L. V. Barbosa, and G. D. Ribeiro, **ORACON: An adaptive model for context prediction**, *Expert Syst. Appl.*, vol. 45, pp. 56–70, 2016, doi: 10.1016/j.eswa.2015.09.016.

Table des Figures

Figure 1: Evolution des coûts réels et des coûts engagés en fonction du cycle de vie du produit [7]	9
Figure 2 : Cadrant de la recherche au LCPI	15
Figure 3 : Exemple de schéma accompagnant une règle de conception dans un manuel	23
Figure 4 : Taxonomie de l'ensemble des règles de conception	26
Figure 5 : Règles appliquées à un modèle paramétrique [68]	24
Figure 6 : Détection d'erreurs de conception [69]	27
Figure 7 : Erreurs de conception détectées dans une maquette numérique [69]	27
Figure 8 : Fusion des ontologies représentant le modèle CAO et le procédé d'usinage [88]	30
Figure 9 : Exemple de représentations sémantiques de deux règles de conception [88]	30
Figure 10 : Traduction d'une règle en langage naturel vers un prédicat logique [104]	32
Figure 11: Représentation d'une règle de conception à partir d'un traitement du langage naturel [104]	32
Figure 12: Modèle des données contextuelles proposé par Da Cunha Mattos et al. [134]	37
Figure 13: Taxonomie du contexte en recherche d'information [137]	38
Figure 14: Exemple de graphe bi-parti pour la recommandation collaborative [146]	39
Figure 15 : Axes scientifiques intégré dans le graphe de connaissances de l'assistant intelligent	44
Figure 16 : Carré de validation traduit de l'anglais [157]	46
Figure 17 : Méthode de résolution adaptée du carré de validation	46
Figure 18 : Validation théorique de la structure	48
Figure 19: Schéma entrées/sorties de CACDA	49
Figure 20: Schéma fonctionnel de CACDA	51
Figure 21: Exemple d'annotations pour une règle de fraisage	53
Figure 22: Nœud représentant une règle de conception reliée à trois de ses mots-clés	59
Figure 23 : Enrichissement sémantique du mot-clé "radius"	60
Figure 24 : Exemple de lien indirect entre les mots-clés "curvature" (courbure) et "slope" (pente)	61
Figure 25 : Sous-contexte sémantique du graphe de connaissances	61
Figure 26 : Exemple de règle reliée au sous-contexte technique et sémantique	63
Figure 27 : Sous-contexte technique du graphe de connaissances	64
Figure 28 : Exemple de relation indirecte entre deux règles de conception	65
Figure 29 : Sous-contexte social du graphe de connaissances	66
Figure 30 : Chemins reliant le sous-contexte numérique à une règle de conception	68
Figure 31 : Sous-contexte numérique du graphe de connaissances	68
Figure 32 : Exemple de consolidation du graphe de connaissances	70
Figure 33: Schéma fonctionnel de CACDA	71
Figure 34 : Développement d'un démonstrateur technique	75
Figure 35 : Structure logicielle du démonstrateur	76
Figure 36 : Architecture logicielle pour l'écriture du graphe de connaissances	78
Figure 37: Nœud représentant une règle de conception reliée à trois de ses mots-clés	79
Figure 38 : enrichissement sémantique du mot-clé "radius"	80
Figure 39 : Interface d'ajout de règles de conception dans le graphe	80
Figure 40 : Ordre des sous-contextes et labels dans le vecteur de position	82
Figure 41 : Exemple de matrice probabiliste de transition	82
Figure 42 : Exemple trois pas de marche aléatoire dans un graphe de quatre nœuds	83
Figure 43 : Interface web pour la recherche de règles de conception	84
Figure 44 : Structure logicielle de la recommandation de règles de conception	85
Figure 45 : Sous-contexte numérique capturé par notre démonstrateur	87
Figure 46 : Capture de l'arbre de conception exemple 1	88
Figure 47 : Capture de l'arbre de conception exemple 2	88

<i>Figure 48 : Processus de recommandation des règles de conception avec capture du sous-contexte numérique</i>	89
<i>Figure 49 : Validation empirique de CACDA</i>	91
<i>Figure 50 : Pièces test pour les expérimentations</i>	92
<i>Figure 51 : Schéma du protocole expérimental</i>	93
<i>Figure 52 : Echelles graduées NASA-TLX pour l'exigence mentale et physique</i>	97
<i>Figure 53 : Pièce finale attendue pour les pré-expérimentations</i>	98
<i>Figure 54 : Brut d'usinage de la pièce test pour les pré-expérimentations</i>	98
<i>Figure 55 : Esquisse de l'épaisseur minimum des murs de renfort.</i>	103
<i>Figure 56 : Brut de la pièce test des expérimentations de faisabilité</i>	103
<i>Figure 57 : Pièce test _ poche principale</i>	104
<i>Figure 58 : Pièce test _ Fin du renfort central en fond de poche</i>	104
<i>Figure 59 : Pièce test _ sous-poche</i>	104
<i>Figure 60 : Pièce test _ liaison vissée</i>	104
<i>Figure 61 : Mesures de charges cognitives des expérimentations de faisabilité</i>	108
<i>Figure 62 : Validation théorique de la performance</i>	114

Table des Tableaux

<i>Tableau 1 : Entités de recherche travaillant à la maîtrise des règles de conception à l'international</i>	13
<i>Tableau 2 : Entités de recherche travaillant à la maîtrise des règles de conception en France</i>	14
<i>Tableau 3: exemple de triplet permettant de répondre à une question simple</i>	55
<i>Tableau 4: Exemple de requête pour une question complexe</i>	55
<i>Tableau 5: sous-contextes existants dans des domaines proches de la conception</i>	57
<i>Tableau 6: sélection des sous-contextes pertinents pour le contexte de conception</i>	58
<i>Tableau 7: Nœuds du sous-contexte sémantique</i>	62
<i>Tableau 8 : Nœuds du sous-contexte technique</i>	65
<i>Tableau 9 : Nœuds du sous-contexte social</i>	67
<i>Tableau 10 : Nœuds du sous-contexte numérique</i>	69
<i>Tableau 11 : Extrait du document source semi-structuré</i>	77
<i>Tableau 12 : Exemple de trois significations du mot-clé radius</i>	79
<i>Tableau 13 : Définition des nœuds additionnels du sous-contexte numérique</i>	87
<i>Tableau 14 : Formules des indicateurs de performance pour la recherche de règles de conception.</i>	96
<i>Tableau 15 : Résultats détaillés de la recherche de règles pour les pré-expérimentations</i>	99
<i>Tableau 16 : Moyennes par groupe des scores de l'axe de recherche des règles</i>	99
<i>Tableau 17 : Résultats de l'axe temporel des pré-expérimentations</i>	100
<i>Tableau 18 : Résultats de l'axe de qualité du modèle numérique des pré-expérimentations</i>	101
<i>Tableau 19 : Etapes de conception de la pièce test</i>	104
<i>Tableau 20 : répartition des groupes pour les expérimentations de faisabilité</i>	105
<i>Tableau 21 : résultats de l'axe e la recherche de règles des expérimentations de faisabilité.</i>	105
<i>Tableau 22 : Résultats de l'axe temporel pour les expérimentations de faisabilité</i>	106
<i>Tableau 23 : résultats de l'axe de qualité du modèle numérique pour les expérimentations de faisabilité</i>	107
<i>Tableau 24 : charges cognitives et difficultés perçues pour les expérimentations de faisabilité</i>	108

Armand HUET

Proposition d'un assistant intelligent dédié aux règles de conception pour l'industrie manufacturière

Résumé : Les règles de conception forment une interface essentielle entre les concepteurs et les connaissances expertes nécessaires à leur activité. Elles permettent de guider les choix des concepteurs afin d'améliorer l'efficacité du processus de conception. La maîtrise de ces règles est un enjeu important pour l'industrie manufacturière. Cependant, on constate que les entreprises ont recours à de nombreux manuels de conception non-structurés, qui nuisent à cette maîtrise. Les concepteurs chargés de la modélisation CAO, doivent en parallèle de leur activité, chercher les règles dont ils ont besoin dans ces manuels de plusieurs centaines de pages. La thèse propose le développement d'un assistant intelligent dédié aux règles de conception pour l'industrie manufacturière afin d'améliorer l'efficacité de la modélisation CAO. A l'inverse des logiciels de qualité de la CAO, cherchant à identifier des erreurs dans la maquette numérique, notre assistant adopte une approche proactive, centrée sur le concepteur. Cette approche repose notamment sur la recommandation en temps réel de règles applicables au contexte de conception. Afin de démontrer la faisabilité et la pertinence de cette approche, un démonstrateur technique de l'assistant a été développé et testé dans le cadre d'un cas d'étude industriel. Ces travaux ouvrent la perspective d'une nouvelle génération d'assistants cognitifs pour la conception, basés sur la capture et l'analyse du contexte de conception.

Mots clés : Règles de conception, CAO, Industrie manufacturière, Sensibilité au contexte, Assistant cognitif, Base de données orientée graphe

Abstract: Design rules are an essential interface between professional designers and the expert knowledge they need to perform their task. They guide designers toward better design choices and contribute to the efficiency of the design process. The mastering of these rules is a crucial issue for the manufacturing industry. However, most companies store their design rules in unstructured design manuals. Design rules research in these manuals of several hundred pages, is complex and tedious. Designers have to work on their CAD modeling activity, while spending time and cognitive resources, researching for applicable design rules. In this thesis, we propose the development of a Context-Aware Cognitive Design Assistant (CACDA) dedicated to design rules for the manufacturing industry in order to improve the efficiency of CAD modeling. Unlike a CAD quality software that seeks to identify design errors in the digital model, our assistant takes a proactive, designer-centric approach. The assistant is able to perform design rules recommendations on the fly based on the design context. The designer can select applicable rules without having to spend the time and effort of a research in a design manual. In order to demonstrate the feasibility and relevance of this approach, a technical demonstrator of the assistant has been developed and tested as part of an industrial case study. This work opens up the prospect of a new generation of cognitive assistants for design, based on the capture and analysis of the design context.

Keywords: Design rules, CAD, Manufacturing industry, Context-awareness, Cognitive assistant, Graph database