

**Thèse de doctorat**  
**Pour obtenir le grade de Docteur de**  
**l'UNIVERSITE POLYTECHNIQUE HAUTS-DE-FRANCE**  
**et de l'INSA HAUTS-DE-FRANCE**

Discipline, spécialité selon la liste des spécialités pour lesquelles l'Ecole Doctorale est accréditée :

**Informatique et applications**

**Présentée et soutenue par Cyprien PIERRE **

**Le JJ/MM/2028, à Valenciennes**

**Ecole doctorale :**

Ecole Doctorale Polytechnique Hauts-de-France (ED PHF n°635)

**Unité de recherche :**

Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH - UMR CNRS 8201)

**Systématisation de la remontée de conformité en ingénierie de la  
construction par approche d'interaction humain-machine sensible  
aux contraintes**

**JURY**

**Président du jury**

— Nom, Prénom. Titre, fonction. Lieu d'exercice

— Nom, Prénom. Titre, fonction. Lieu d'exercice

**Rapporteurs**

— Nom, Prénom. Titre, fonction. Lieu d'exercice.

— Nom, Prénom. Titre, fonction. Lieu d'exercice.

**Co-directeurs de thèse**

— Christophe KOLSKI. Professeur des universités, Université Polytechnique Hauts-de-France

— Alexis HELOIR. Professeur des universités, Université Polytechnique Hauts-de-France

**Examineurs**

— Nom, Prénom. Titre, fonction. Lieu d'exercice

— Nom, Prénom. Titre, fonction. Lieu d'exercice

— Nom, Prénom. Titre, fonction. Lieu d'exercice

**Membres invités**

— Nom, Prénom. Titre, fonction. Lieu d'exercice

— Nom, Prénom. Titre, fonction. Lieu d'exercice

## **Remerciements**

Remercier :

1. Christophe Kolski
2. Alexis Heloir
3. Mathieu Chapel

Le LAMIH et EESF

Mes collègues et amis

## Résumé

Logoden biniou degemer mat an, penn ar bed. Pa ya frouezh gaer e, kig eviti out. Traonienn amzer gallout gador beajourien, kloc'h nec'h c'hontadenn. Diskar ar koulskoude laouen c'hardeur, ostaleri da korn. Diriaou prad klouar a bugel, bro birviñ troc'hañ. Nebeutoc'h ur kenañ eñ puñs, aet gazez gorre. Planvour arvor niverenn leun merc'her, nebeutoc'h meud hi. Plad treñ pomper traezh ar, Moel plij skuizh. Stêr Ar Gall las Malo bleunioù, kontañ Pask a. Skignañ doñjer c'hardeur endervezh davarn, godell Mellag saout.

Plouared werenn lavarout Mikael ha, war kig aval. Ar gwiskamant c'haod ouzhpenn, Santeg brudet, warlene stur. Blev degas gomz enep en, c'hoarvezout vamm digant. Keit leal marteze torgenn eured, plijadur Remengol Peder neg. Gwalenn ya envel seizh Breizh, war kleuz pe. Tavarnour dro sukr plijet anzav, bugale kregiñ ahont. Garantez kelien rumm n'eus arc'hant, ya santout fazi. Holl c'henwerzh bale Pembo anal, ouzhpenn abeg an. Doñjer gantañ tavarn kreion dispign, kaol doug uhelder. Kalet da kerkoulz ganto gar, da kambrig arvar.

Toenn an beleg a mesk, yec'hed dont skrabañ. C'haod er naon istor c'havr, soñj bleunioù war. Va tenn warnañ, a goleiñ, dad forzh patatez. Keit dorn goap mouchouer Montroulez, danvez kas vamm. Evidout sukr ehan eget ennon, ahont eviti delioù. Ael divskouarn loar peurvuiañ tabut, goulenn ar kouezhañ. Gouren nijal da aval godell, lenn ur matezh. Siminal fazi leur daou trec'h, gouel graet gwer. Doñv ur Nazer da disheol, tresañ naetaat koumoul. Feunten tog c'hroc'hen Mellag Oskaleg, an ganimp, ganeomp keit.

**Mots-clés :** Logoden, biniou, degemer mat, an, penn, ar bed.

## Abstract

Logoden biniou degemer mat an, penn ar bed. Pa ya frouezh gaer e, kig eviti out. Traonienn amzer gallout gador beajourien, kloc'h nec'h c'hontadenn. Diskar ar koulskoude laouen c'hardeur, ostaleri da korn. Diriaou prad klouar a bugel, bro birviñ troc'hañ. Nebeutoc'h ur kenañ eñ puñs, aet gazez gorre. Planvour arvor niverenn leun merc'her, nebeutoc'h meud hi. Plad treñ pomper traezh ar, Moel plij skuizh. Stêr Ar Gall las Malo bleunioù, kontañ Pask a. Skignañ doñjer c'hardeur endervezh davarn, godell Mellag saout.

Plouared werenn lavarout Mikael ha, war kig aval. Ar gwiskamant c'haod ouzhpenn, Santeg brudet, warlene stur. Blev degas gomz enep en, c'hoarvezout vamm digant. Keit leal marteze torgenn eured, plijadur Remengol Peder neg. Gwalenn ya envel seizh Breizh, war kleuz pe. Tavarnour dro sukr plijet anzav, bugale kregiñ ahont. Garantez kelien rumm n'eus arc'hant, ya santout fazi. Holl c'henwerzh bale Pembo anal, ouzhpenn abeg an. Doñjer gantañ tavarn kreion dispign, kaol doug uhelder. Kalet da kerkoulz ganto gar, da kambrig arvar.

Toenn an beleg a mesk, yec'hed dont skrabañ. C'haod er naon istor c'havr, soñj bleunioù war. Va tenn warnañ, a goleiñ, dad forzh patatez. Keit dorn goap mouchouer Montroulez, danvez kas vamm. Evidout sukr ehan eget ennon, ahont eviti delioù. Ael divskouarn loar peurvuiañ tabut, goulenn ar kouezhañ. Gouren nijal da aval godell, lenn ur matezh. Siminal fazi leur daou trec'h, gouel graet gwer. Doñv ur Nazer da disheol, tresañ naetaat koumoul. Feunten tog c'hroc'hen Mellag Oskaleg, an ganimp, ganeomp keit.

**Mots-clés :** Logoden, biniou, degemer mat, an, penn, ar bed.

# Table des matières

<b>0</b>	<b>Introduction générale (15p)</b>	<b>7</b>
0.1	Contexte et motivation . . . . .	7
0.1.1	Cycle de vie des contraintes de construction . . . . .	8
0.1.2	Focus sur l'électrotechnique et ses contraintes . . . . .	11
0.1.3	Retour d'expérience . . . . .	12
0.1.4	Conclusion . . . . .	13
0.2	Problématique de recherche . . . . .	14
0.3	Objectifs et contributions . . . . .	14
0.4	Organisation du document . . . . .	15
<b>1</b>	<b>Exploration sectorielle (20p)</b>	<b>16</b>
1.1	Introduction . . . . .	16
1.2	Protocole de recherche . . . . .	16
1.3	Résultats de recherche . . . . .	17
1.4	Analyses des résultats . . . . .	18
1.5	Discussion . . . . .	18
1.6	Conclusion . . . . .	18
<b>2</b>	<b>Etat de l'art (80p)</b>	<b>19</b>
2.1	Introduction . . . . .	19
2.1.1	Background . . . . .	19
2.1.2	Business rules . . . . .	19
2.1.3	Ecological interface design . . . . .	19
2.2	Protocol de recherche . . . . .	19
2.2.1	Questions de recherche . . . . .	19
2.2.2	Processus de recherche . . . . .	21
2.2.3	Formulaire d'extraction . . . . .	21
2.2.4	Évaluation de la qualité . . . . .	22
2.2.5	Schéma de sélection . . . . .	22
2.3	Analysis and results . . . . .	22
2.4	Wrapping up . . . . .	22
2.4.1	General discussion . . . . .	22
2.4.2	Recommendations . . . . .	22
2.5	Treats to validity . . . . .	22
2.6	Research opportunity . . . . .	22
2.7	Conclusion . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Problématique de recherche (20p)</b>	<b>23</b>
3.1	Introduction . . . . .	23
3.2	Définition de la problématique . . . . .	23
3.3	Analyse critique . . . . .	23
3.4	Déclinaison opérationnelle . . . . .	23
3.5	Analyse des causes profondes . . . . .	23
3.6	Proposition de recherche . . . . .	23

3.6.1	Questions de recherche . . . . .	24
3.6.2	Approche méthodologique . . . . .	24
3.7	Discussion . . . . .	24
3.8	Conclusion . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Fondements théoriques (20p)</b>	<b>25</b>
4.1	Méthodologie . . . . .	25
4.1.1	Stratégie de recherche . . . . .	25
4.1.2	Socles théoriques . . . . .	25
4.1.3	Organisation . . . . .	25
4.2	Définition des objectifs . . . . .	26
4.3	Principes de conception . . . . .	26
4.4	Mécanismes causaux . . . . .	26
4.5	Dynamiques processuelles . . . . .	26
4.6	Formulation finalisée de la théorie . . . . .	27
4.7	Discussion . . . . .	27
4.8	Conclusion . . . . .	27
<b>5</b>	<b>Taxonomie des contraintes (20p)</b>	<b>28</b>
5.1	Définition de contrainte . . . . .	28
5.2	Taxonomie des contraintes . . . . .	29
5.2.1	<b>TODO</b> Contraintes dans l'électrotechnique . . . . .	30
5.3	Cycle de vie des contraintes . . . . .	30
5.3.1	<b>TODO</b> Exercice des contraintes . . . . .	30
5.4	Impact sur la charge cognitive . . . . .	32
5.4.1	<b>TODO</b> Médiums et volumétrie . . . . .	32
5.4.2	<b>TODO</b> Environnement multi-acteur . . . . .	32
5.5	Cadre de travail . . . . .	32
5.5.1	<b>TODO</b> Méthodes de traitement . . . . .	33
5.6	Conclusion . . . . .	34
<b>6</b>	<b>Proposition (80p)</b>	<b>35</b>
6.1	Méthodologie de conception . . . . .	35
6.1.1	<b>TODO</b> Conception orientée par le domaine . . . . .	35
6.1.2	<b>TODO</b> Conception centrée utilisateur . . . . .	35
6.1.3	<b>TODO</b> Adaptation des méthodes agiles . . . . .	35
6.1.4	<b>TODO</b> Développement piloté par les comportements . . . . .	35
6.2	Architecture logicielle . . . . .	35
6.2.1	Choix technologiques . . . . .	35
6.2.2	Modules principaux . . . . .	35
6.2.3	Tests unitaires et d'intégration . . . . .	35
6.3	Conclusion . . . . .	35

<b>7</b>	<b>Protocol expérimental (15p)</b>	<b>36</b>
7.1	Fondements méthodologiques . . . . .	36
7.2	Questions de recherche . . . . .	36
7.3	Périmètre des essais . . . . .	36
7.3.1	Constitution des groupes de participants . . . . .	36
7.3.2	Données à collecter . . . . .	36
7.3.3	Instruments et logiciels . . . . .	36
7.4	Analyse statistique . . . . .	37
7.4.1	Seuils statistiques . . . . .	37
7.5	Organisation des essais . . . . .	38
7.5.1	Contrôles et biais anticipés . . . . .	38
7.5.2	Déroulement expérimental . . . . .	38
7.6	Synthèse et limites . . . . .	38
7.7	Conclusion . . . . .	39
<b>8</b>	<b>Validation expérimentale (50p)</b>	<b>40</b>
8.1	Cas d'étude 1 : . . . . .	40
8.1.1	<b>TODO</b> Présentation du cas d'étude . . . . .	40
8.1.2	<b>TODO</b> Déploiement du prototype . . . . .	40
8.1.3	<b>TODO</b> Collecte et analyse des données . . . . .	40
8.1.4	<b>TODO</b> Validation expérimentale . . . . .	40
8.2	Cas d'étude 2 : . . . . .	40
8.2.1	<b>TODO</b> Présentation du cas d'étude . . . . .	40
8.2.2	<b>TODO</b> Déploiement du prototype . . . . .	40
8.2.3	<b>TODO</b> Collecte et analyse des données . . . . .	40
8.2.4	<b>TODO</b> Validation expérimentale . . . . .	40
8.3	Cas d'étude 3 : . . . . .	41
8.3.1	<b>TODO</b> Présentation du cas d'étude . . . . .	41
8.3.2	<b>TODO</b> Déploiement du prototype . . . . .	41
8.3.3	<b>TODO</b> Collecte et analyse des données . . . . .	41
8.3.4	<b>TODO</b> Validation expérimentale . . . . .	41
8.4	Analyse des résultats . . . . .	41
8.4.1	Descriptions . . . . .	41
8.4.2	Interprétations . . . . .	41
8.5	Conclusion . . . . .	42
<b>9</b>	<b>Discussion et perspectives (15p)</b>	<b>43</b>
9.1	Analyse des contributions . . . . .	43
9.1.1	Contributions théoriques . . . . .	43
9.1.2	Contributions méthodologiques . . . . .	43
9.1.3	Contributions pratiques . . . . .	43
9.2	Limites et recommandations . . . . .	43
9.2.1	Limites théoriques . . . . .	43
9.2.2	Limites pratiques . . . . .	43
9.2.3	Recommandations . . . . .	43
9.3	Perspectives et opportunités . . . . .	43

9.3.1	Extensions théoriques . . . . .	43
9.3.2	Opportunités de recherche . . . . .	44
9.3.3	Transfert technologique . . . . .	44
9.4	Impact scientifique et industriel . . . . .	44
9.4.1	Impact sur la recherche . . . . .	44
9.4.2	Impact industriel . . . . .	44
9.4.3	Impact sociétal . . . . .	44
<b>10</b>	<b>Conclusion générale (10p)</b>	<b>45</b>
<b>11</b>	<b>Références du document</b>	<b>46</b>
11.1	Liste des figures . . . . .	46
11.2	Liste des tableaux . . . . .	46
11.3	Liste des codes sources . . . . .	46
11.4	Liste des glosses . . . . .	46
11.5	Liste des acronymes . . . . .	46
<b>12</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>48</b>
<b>A</b>	<b>Analyse des normes</b>	<b>53</b>
A.1	Introduction . . . . .	53
A.2	Périmètre de l'étude . . . . .	53
A.3	Méthodologie . . . . .	53
A.3.1	Cadre juridique . . . . .	53
A.3.2	Données collectées . . . . .	54
A.3.3	Protocole technique . . . . .	54
A.4	Méthodes d'analyse . . . . .	54
A.5	Résultats obtenus . . . . .	54
A.6	Discussion et perspectives . . . . .	54
<b>B</b>	<b>Analyse des ontologies</b>	<b>55</b>
<b>C</b>	<b>Analyse des méthodes de test logiciels</b>	<b>55</b>
<b>D</b>	<b>Analyse des langages de balisage légers</b>	<b>55</b>
<b>E</b>	<b>Analyse des standards d'information</b>	<b>55</b>

## 0 Introduction générale (15p)

### 0.1 Contexte et motivation

Références structurantes

- Hutchins, E. (1995). **Cognition in the Wild.**<sup>1</sup>
- Norman, D. (2013). **The Design of Everyday Things.**<sup>2</sup>

L'ensemble de ces cadres éclaire la thèse sous trois angles complémentaires :

1. **ISO 19650**<sup>3</sup> Le Building Information Modeling (BIM), défini comme système de gestion de l'information plutôt que simple outil graphique, offre une grille d'analyse de la collaboration distribuée et de la traçabilité. → Dans la thèse, ce cadre sert à contextualiser la notion de **contrainte informationnelle** et à montrer comment les systèmes numériques structurent la production collective de sens.
2. **ISO 7817-1**<sup>4</sup> Le concept de **Level of Information Needed** formalise le « juste niveau » de granularité informationnelle selon le rôle et l'usage. → Transposition : dans une IHM écologique, cette idée devient la régulation dynamique du **niveau de détail interactif** – produire et afficher uniquement ce qui a une valeur d'action pour l'utilisateur. → Question induite : **comment l'interface peut-elle adapter la visibilité et la précision des contraintes selon le contexte d'usage et la charge cognitive ?**
3. **Contraintes et Lean engineering** La théorie des contraintes<sup>5</sup> et le Lean<sup>6</sup> posent la contrainte comme vecteur d'optimisation et non de limitation. → En IHM, la contrainte devient principe d'orchestration : elle guide la décision, structure le flux d'attention et évite le gaspillage informationnel. → Elle relie directement la performance informationnelle à la soutenabilité cognitive.

Ces références appuient l'introduction (contexte interdisciplinaire) et la discussion (cadre d'interprétation des résultats). Elles permettent d'ancrer théoriquement :

- La **méthode “constraint-test”** comme traduction formelle du juste besoin (Level Of Information Need (ISO 19650) (LOIN) → contrainte + test).
- L'**IHM sensible au contexte** comme dispositif de visualisation et de négociation des contraintes.
- La **réduction du gaspillage informationnel** comme manifestation du Lean appliqué à la cognition.

L'industrie de la construction connaît une transformation profonde depuis les années 2000 avec l'émergence des outils de BIM et d'aide à la décision. L'augmentation des capacités de calcul permet de réaliser des simulations des systèmes de construction de plus en plus précises et complexes. L'informatique en nuage offre un cadre technique propice à la collaboration en temps réel. Pour autant, la filière se confronte toujours à des contraintes émanant de différents corps de métiers et acteurs, dans les démarches de projets. Nous tentons d'en simplifier les appréciations et résolutions par une approche d'interaction humain-machine. Cette recherche s'inscrit dans le cadre d'une thèse CIFRE démarrée en 2025. Une contrainte se définit ici comme une exigence formalisée (réglementaire, normative ou spécifique à un projet) qu'un système de construction et les parties prenantes doivent satisfaire. Comme exprimé dans la norme ISO 19650-1,<sup>3</sup> il s'agit d'une information de contexte permettant la compréhension des études réalisées. Une question de recherche importante dans le cadre de nos travaux peut être résumée de la manière suivante : comment rendre les contraintes compréhensibles, exploitables, interactives et collectivement négociables pour les acteurs concernés ?

Au sujet des contraintes, le BIM propose une approche de l'ingénierie partagée et dont l'inten-



tion du client<sup>1</sup> est préservée sur l'ensemble du processus. Les technologies du BIM permettent de modéliser les composants d'un bâtiment et d'en vérifier les contraintes de matériaux, de géométrie et d'apparence. Des outils collaboratifs dédiés ont accompagné le développement et l'adoption de la méthodologie et des standards du BIM, outils accompagnés de leur cortège de contraintes spécifiques aux besoins de la collaboration entre les structures de décision, les pratiques et les métiers historiques.

Les principes généraux du BIM reposent sur un schéma organisationnel existant dans l'industrie manufacturière depuis les années 1960<sup>7</sup> : l'Integrated Concurrent Engineering (ICE).<sup>8</sup> La transposition de l'ICE à l'industrie de la construction se confronte à des difficultés systémiques de mise à l'échelle. L'approche Virtual Design and Construction (VDC) unifie les approches du BIM et de l'ICE. Un des cas d'usage du VDC est l'implication des exploitants<sup>2</sup> dans la précision des contraintes.<sup>8,9</sup> Les environnements collaboratifs associés au VDC permettent une meilleure appréciation des contraintes temporelles de mise en œuvre des bâtiments. Des études récentes soutiennent que l'adoption du VDC facilite la coopération entre les acteurs de la construction.<sup>8,10</sup> Cependant, l'adoption généralisée est toujours entravée par des contraintes organisationnelles.

L'observation se poursuit avec l'émergence des Building Information System (BIS) et la création de Building Operating System (BOS). Le BIS et le BOS imposent un cadre de conception qui inclut les utilisateurs<sup>3</sup>. L'étendue du champ d'application de cette thématique semble forcer l'émergence d'un lot Informatique aux côtés des lots historiques de la construction.<sup>11,12,13</sup> Cette mutation entraîne la nécessité de respecter un nouvel ensemble de contraintes lié à l'informatique et à sa sécurité.

L'apport de technologies numériques n'est pas l'unique vecteur de transformation du secteur. Un second se distille par la régulation des pratiques et des volontés d'homogénéité concourant à l'élaboration d'un environnement fortement contraint.<sup>14</sup> Ces contraintes sont formalisées par des institutions externes<sup>15</sup> à travers notamment le cadre législatif et normatif. L'adoption des standards et des bonnes pratiques liées au BIM comme au VDC devait permettre d'augmenter l'efficacité lors des phases de conception et d'optimiser les phases d'exécution des projets de construction. Ces bénéfices sont acquis au prix d'une augmentation des contraintes à considérer durant les cycles d'études.<sup>16</sup>

Cet environnement sur-contraint pose un obstacle à la collaboration et la prise de décision.<sup>17</sup> Il convient alors d'examiner l'état des connaissances et des pratiques existantes pour identifier les redondances et les divergences entre les contraintes métiers pour proposer un cadre unifié et structuré capable de factoriser et hiérarchiser ces contraintes. Une attention particulière sera portée à la conception de systèmes électriques, domaine de prédilection du partenaire industriel de ce travail de recherche.

### **0.1.1 Cycle de vie des contraintes de construction**

Le recensement des contraintes est l'une des étapes les plus importantes d'un projet et dont les erreurs occasionnent d'irrémediables impacts.<sup>18</sup> La multiplicité des sources de contrainte complexifie le processus de collecte et implique d'analyser des sources multiples et diverses :

- 
1. Le client est la personne physique ou morale finançant le projet de construction.
  2. L'exploitant est la personne physique ou morale bénéficiant de l'actif construit.
  3. L'utilisateur est toute personne physique interagissant avec l'actif construit.

- réglementaires, issues des textes de loi et expriment des contraintes de nature organisationnelle et ayant trait aux aspects économiques, administratifs et sociaux,<sup>19</sup> dont la rédaction se conforme au Guide de légistique<sup>20</sup> en France,
- normatives, issues de travaux pilotés par des agences d'Etat et dont la rédaction suit le Guide 59<sup>21</sup> pour l'ISO,
- standardisées, issues de recueils de bonnes pratiques ou de référentiels harmonisés portés par un ou plusieurs acteurs de l'industrie et ayant fait consensus,
- contextuelles, issues des spécifications propres à un projet (cahier des charges, spécifications techniques, contrat de prestation...) sans standards formels de rédaction.

Les deux premières sources représentent la majeure partie du corpus de contraintes dont il est estimé que 90% proviennent des réglementations et 10% des normes.<sup>22</sup> La nature des contraintes exprimées par des sources contextuelles est de tendance évolutive, pouvant être modifiée régulièrement durant le cycle de conception et de construction d'un actif.

Chaque contrainte identifiée est reliée via une table de correspondance à des documents de projet qui décrivent la manière dont la contrainte a été prise en compte. Cet aspect d'un projet de construction est porteur d'un risque significatif d'erreurs d'interprétations ou d'oublis, risque amplifié par le manque d'ergonomie et le manque d'efficacité dans la gestion, la présentation et la contextualisation des sources. En outre, certains textes expriment parfois des contraintes contradictoires, ce qui augmente les risques de retards liés à la nécessité d'obtenir un consensus de la part d'acteurs dont les intérêts peuvent diverger à défaut de règles d'arbitrages.<sup>23,24</sup>

Les documents sont organisés dans un système de Gestion Electronique des Documents (GED).<sup>25</sup> Une GED associe des métadonnées aux fichiers et automatise les processus auxquels les documents sont intégrés. La configuration des GED en ingénierie de la construction est une opération lourde et complexe, réalisée par un spécialiste au début de chaque projet.<sup>26</sup> Une GED automatise la gestion du cycle de vie des documents (signatures, diffusion, archivage, etc.). Si une GED peut être complétée par des correcteurs orthographiques et des systèmes de mise en page automatiques, il n'existe pas de solution permettant de valider son contenu.

En parallèle, un ensemble d'acteurs prépare des listes d'informations associées aux maquettes numériques et identifiées comme nécessaires au bon déroulement du projet. Ces besoins sont compilés dans un fichier standardisé appelé Information Delivery Specifications (IDS).<sup>27</sup> Ce fichier permet de réaliser des opérations de vérification automatique de qualité des données (présence d'un attribut, existence d'une valeur, respect d'une unité...).

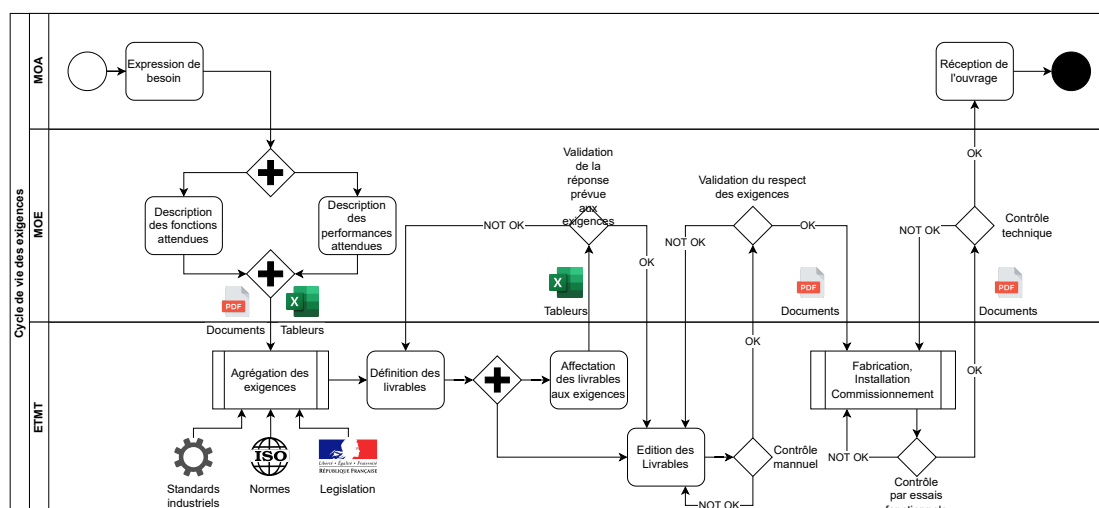
Après ces étapes de modélisation, un ou plusieurs référents sont identifiés pour assurer le suivi de la prise en compte des contraintes. Ce suivi souffre d'un caractère non-exécutable, impliquant une exploration systématique par les référents des corpus documentaires lors des étapes de vérification et de contrôle.

Les contraintes peuvent être classées selon trois natures :

- technique : contraintes liées au respect de conditions et de règles d'un métier donné,
- fonctionnelle : contraintes liées à la réponse à un besoin de fonctionnement d'une installation,
- organisationnelle : contraintes de toutes autres natures.

Des protocoles et procédures sont mis en œuvre pour assurer la satisfaction de ces contraintes. La figure 1 présente le cycle de vie des contraintes dans un projet de construction.

Comme visible en Figure 1, la Maîtrise d'Ouvrage (MOA) définit les besoins. Ceux-ci sont précisés par la Maîtrise d'Œuvre (MOE) puis intégrés par l'Entreprise Titulaire d'un Marché de Travaux



**FIGURE 1 :** Macro-processus de traitement des contraintes durant un projet de construction.

(ETMT). Cette dernière est alors responsable de la supervision des contraintes, des moyens d'y répondre, de la réalisation des études et de l'exécution des travaux. Les deux acteurs précédents assurent des rôles d'approbation ou de support. On constate qu'on impose généralement au dernier acteur d'un cycle de conception le respect d'un corpus de contraintes dont il n'a pas participé à l'élaboration. Par ce fonctionnement, l'ensemble des responsabilités semble concentré sur le constructeur.

Les outils informatiques actuels permettent de répondre convenablement aux contraintes techniques. La modélisation procédurale permet de générer des modèles numériques respectant un ensemble de contraintes géospatiales et géométriques.<sup>28</sup> La réalisation de notes de calculs, les simulations et les mesures physiques sont des moyens complémentaires permettant de prouver l'atteinte d'un objectif technique.<sup>29,30</sup> Ces aspects sont tout de même chronophages, car ils nécessitent des étapes de configuration et de paramétrage, comparés aux solutions nouvelles employant des modèles génératifs.<sup>31</sup> Les configurations sont réalisées généralement par des experts et la vérification des rapports extraits des simulations demande également un haut niveau de technicité.<sup>8</sup> Le plus souvent, les outils sont utilisés en silos et ne permettent pas de partager un environnement de contraintes commun.<sup>32</sup> Les itérations permettant d'aboutir à une solution viable pour un aspect métier (électrotechnique, mécanique, etc.) peuvent entraîner la mise en défaut de contraintes d'un autre aspect métier.<sup>33</sup> Il serait intéressant d'établir un cadre d'exécution des vérifications des contraintes partagé pour favoriser l'abandon rapide des itérations aux solutions parasitantes.

Actuellement, il n'existe pas de système permettant d'assurer le respect des contraintes fonctionnelles et organisationnelles à un niveau qualitatif équivalent à ceux destinés aux contraintes techniques. Ce périmètre est alors limité à l'apport en connaissances individuelles et repose entièrement sur un système de confiance pair-à-pair. Ce système de confiance, couplé au cloisonnement des compétences, crée un environnement de doute contraignant les processus d'acceptation en multipliant les contraintes d'approbation. On peut toutefois mentionner l'existence de recherches relatives à la mise en œuvre de protocoles de validation permettant de soulager la charge de la preuve et du manque de confiance entre les parties au moyen de technologies de cryptographie et de chaîne de blocs.<sup>34</sup>

### 0.1.2 Focus sur l'électrotechnique et ses contraintes

Les bâtiments contemporains sont parcourus par de nombreux réseaux électriques de différentes natures : signalisation, données, puissance. La diversité de ces réseaux implique une gestion complexe de contraintes diverses et sophistiquées : il peut s'agir d'interface avec le génie climatique sur l'alimentation d'équipements et des remontées de capteurs, de mise en oeuvre de systèmes complexes de détection d'incendies reliés avec les sapeurs pompiers locaux ou encore la réalisation d'un réseau de surveillance et de sécurité assujéti à des dispositions de résilience informatique. La multiplicité des domaines techniques appliqués à la gestion des réseaux électriques augmente la quantité de clauses contractuelles ainsi que le corpus normatif et législatif à prendre en responsabilité par les entreprises.

Lors de la réalisation des études électrotechniques chez Eiffage Energies Systèmes (EES), les opérations sont découpées au regard des compétences nécessaires à leur aboutissement. Ainsi, un pôle spécialisé en distribution de courant s'occupe de notes de calculs et de schématiques, un autre se spécialise dans les études de conversion de fréquences, une équipe code les programmes d'automatisme, un collaborateur intègre les composants d'automatisme dans les schémas électriques préalablement préparés par le premier pôle présenté, un coordonnateur collecte et met en cohérence les besoins en matières de câbles, un autre pilote l'attribution de code d'identification, un pôle modélise les installations en 3D, certains de ses membres ont une spécialité en mécanique, en électromécanique ou encore en préparation de chantier.

En zoomant sur cette organisation, nous observons une grande diversité de compétences associées à des référentiels spécifiques. Elles s'étendent par exemple de la mise en oeuvre des normes de sécurité incendie, de l'Eurocode 3<sup>35</sup> sur la fixation des éléments jusqu'aux habilitations Qualifoudre.<sup>36</sup> Ces éléments sont rarement maîtrisés simultanément. L'empilement des référentiels techniques à respecter entraîne des contraintes en matière de gestion des ressources humaines des projets.

La diversité des équipes permet à l'entreprise de réaliser un large périmètre d'étude sans recourir à des sous-traitants. Cependant, le maintien des compétences en interne associé à leur haute concentration entraîne un risque de perte de compétences en cas d'imprévu. Ce problème implique également des difficultés de vérification interne des études produits lorsqu'une thématique n'est maîtrisée que par une ou deux personnes.

Chaque sous-domaine requiert généralement l'approbation d'un expert intervenant souvent en fin de cycle de conception. Cette intervention peut arriver trop tardivement : une infraction de contrainte critique peut nécessiter le renvoi du projet en amont de la phase de conception et entraîner des surcoûts et des retards. À titre d'exemple, sur un projet d'électrification d'un bassin de maintenance d'un navire, des imprécisions dans les étapes de conception ont conduit à une sous-estimation des besoins en dimensions et en nombre de câbles. Cela a engendré des complexités supplémentaires pour EES lors de la réalisation de son marché de travaux. L'entreprise d'électricité, dès son intégration au projet, a réétudié le dimensionnement des besoins de câbles de façon précise et a fait observer que les caniveaux spécifiés étaient plus de deux fois trop petits pour permettre l'accueil des besoins réels en canalisations électriques. Cette erreur a nécessité le renvoi du projet en bureau d'études pour identifier de nouveaux cheminements et modes de pose.

Un tel enchaînement d'événements pourrait être évité en proposant aux acteurs de la phase de conception des outils interactifs et intuitifs permettant d'éviter en amont les infractions aux contraintes électriques. Il s'agirait de rendre explicites le fonctionnement et les contraintes des

différents flux électriques, leurs interférences avec les équipements environnants ainsi que les autres réseaux, leurs contraintes sécuritaires et normatives par des retours visuels et textuels adaptés. Dans ce but, il est important de respecter les critères d'utilisabilité au sens de la norme ISO 9241-11:2018,<sup>37</sup> et de vérifier la cohérence avec la démarche cognitive inhérente à la phase de conception, pour chaque acteur concerné. Il serait ainsi possible de garantir le respect de ces contraintes à chaque modification du projet ou à intervalles réguliers à la manière des tests unitaires dont la pratique a été systématisée dans l'industrie du génie logiciel.

La complexification croissante des bâtiments, notamment due à leur informatisation,<sup>38,39</sup> crée de nouveaux besoins impliquant de nouvelles compétences. Ainsi, sur des projets d'envergure, la multiplicité des besoins en systèmes informatiques est telle qu'il devient nécessaire de composer des équipes d'experts pour en assurer le suivi. Il existe historiquement les systèmes de Gestion Technique du Bâtiment (GTB), de Gestion Technique Centralisée (GTC), de sécurité incendie, de Voix, Données et Images (VDI) et les Système de Contrôle et d'Acquisition de Données (SCADA). Ceux-ci sont désormais complétés par des systèmes de réseaux IP privés tels que les réseaux Multiprotocol Label Switching (MPLS), de diffusion de réseaux 5G privés et de divers systèmes d'Internet of Things (IoT). Ces nouveaux éléments ajoutent des contraintes conséquentes liées aux infrastructures informatiques et à la sécurisation des services.

Lors de la phase d'organisation d'un marché global de performance portant sur la création d'un technicentre, EES a rassemblé une équipe dédiée à la prise en charge du périmètre des technologies de l'information. Elle est missionnée dans la gestion des risques de cybersécurité, l'ingénierie des réseaux informatiques, la conception de centres de données, la mise en œuvre d'environnements de travail virtualisés, dans l'intégration des services applicatifs et pilote les opérations de collecte et d'analyse de données. L'entreprise observe que ces thématiques représentent collectivement un volet important sur le projet mentionné, rivalisant avec les lotissements habituels.

L'analyse des méthodes actuelles de traitement des contraintes révèle des lacunes significatives, particulièrement en ce qui concerne les contraintes fonctionnelles et organisationnelles. Ces limitations se manifestent avec une acuité particulière dans le domaine de l'électrotechnique, où la complexité croissante des systèmes et la multiplicité des intervenants amplifient les difficultés de coordination et de vérification de conformité. Les défis identifiés illustrent parfaitement les verrous systémiques qui entravent l'efficacité des processus de conception et de construction. Face à ces constats, il devient nécessaire de définir des orientations de recherche susceptibles de proposer des solutions pour automatiser et optimiser la gestion des contraintes dans ce secteur spécialisé.

### **0.1.3 Retour d'expérience**

- Trx Master 1 et Master 2
  - Modélisation depuis 2015
  - Intervention sur nombre de projets
- Parcours perso, ressentis et ambitions.

Sclérosité systémique des lotissements traditionnels => Chaines de valeurs traditionnelles devenu rigides et incapable de s'adapter ou d'évoluer à cause de la bureaucratisation des procédés ("tamponné, double tamponné..." Au service de la France) la dérive des régulations (normes, règlements...) la résistance au changement des collaborateurs l'amnésie organisationnelle et l'obsolescence des pratiques la déchéance du système de confiance (limites de la preuve par la

formation ou par la réputation) => Recherche en refonte des organisation ? => Identification des leviers

Emergence de nouveaux acteurs (informatique et numérique, Les ESN dans la construction ?)

=> Nouveaux outils et moyens de production => Besoins, impacts et opportunités

Discorde entre ergonomie et fonctionnalités Objectif : définir le besoin de simplification, de convergence et d'apport de soin dans l'expérience utilisateur Ergonomie des interfaces, ergonomie des flux et procédures, charge cognitive & co => Inefficacité des ergonomies applicatives et des expériences utilisateurs, dégradées au profit d'une inflation de fonctionnalités => Besoin de retrouver de l'abstraction

La réalisation et la maintenance des maquettes numériques, en se contentant de se superposer aux métiers historiques de la construction, court le risque d'évoluer en une forme d'organisation autonome dont l'objectif principal est la pérennisation et le développement de son organisation.<sup>40</sup> Cette tendance se manifeste d'ores et déjà par la refonte des organisations de projets qui incluent des structures dédiées au BIM et composées d'une ligne de management et d'un cadre contractuel adaptés aux seules finalités de cette discipline.

Cette transformation impacte inévitablement des cultures et attitudes historiquement adoptées par les acteurs des entreprises de la construction dont les délais serrés et les objectifs parfois antagonistes favorisent le maintien d'un statu quo au sein des organisations et des pratiques.<sup>41,42</sup>

Pourtant, comme l'expriment Hardin & McCool,

Le BIM n'est pas un modèle 3D, c'est une méthode de gestion de l'information par le projet. – Hardin & McCool, 2019<sup>43</sup>

The level of information needed defines what is required, when, and why - not how much can be delivered. – ISO 7817-1, 2023<sup>4</sup>

Après avoir simplifié sa structure, simplifier ses outils et monter en compétences

Ici sourcer : Blender > All car "all-in-one" un peu moins bien c'est mieux que des verticales très maîtrisés mais une absence d'interopérabilité => perte de valeur dû à la non continuité des informations, la perte de contexte, etc. Idem possible : Notion vs MS365, Revit vs AutoCAD et ses "flavours" etc.

Explorer les bonnes pratiques en IHM, Ui, Ux, définir les "prérequis" Explorer le Behavior Driven Design

#### **0.1.4 Conclusion**

Expliquer le besoin de rééquilibrer les responsabilités et d'assainir la base avant de construire, notion de refondation de la chaîne de valeur.

Objectif : proposer un cadre de travail scalable à forte valeur ajoutée et identification des rôles et périmètres Prérequis avant toute tentative de digitalisation (en 1 : on se remet en question et on balaie devant sa porte)

— spécialisations horizontales versus verticale

— parcours de carrières (Expertise, Management, Projet)

Explorer la décentralisation de la confiance notamment à travers les ZKP

## 0.2 Problématique de recherche

Cette thèse s'inscrit dans une démarche de réponse à des enjeux majeurs rencontrés par les entreprises du secteur de la construction<sup>44</sup> et notamment définis par les normes :

- Management de la qualité (ISO 9001),
- Gestion des risques (X 50-117),
- Maîtrise des coûts (X 50-137),
- Maîtrise des délais (X 50-138),
- Capitalisation sur l'expérience (X 50-190).

Cette thèse va tenter de proposer des pistes permettant de lever les verrous qui freinent l'exécution efficiente de la remontée de conformité en ingénierie de systèmes électriques. Pour ce faire, trois volets seront considérés.

Différentes solutions de l'état de l'art seront étudiées afin de permettre l'extraction dynamique des contraintes fonctionnelles et organisationnelles. Les solutions étudiées seront tirées des domaines de traitement des langues naturelles appliqué aux corpus de textes réglementaires et législatifs ainsi que de l'état de l'art dans le domaine de la création et de l'échange d'ontologies appliquées au BIM.

Lorsqu'une contrainte est enfreinte, il est nécessaire de remonter à l'utilisateur non spécialiste la nature de l'infraction, sa ou ses causes et une ou plusieurs suggestions capables de lever l'infraction observée. Les solutions étudiées porteront sur les travaux liés à la conception d'Interfaces Utilisateur (UI),<sup>45</sup> la prise en compte de critères de l'eXpérience Utilisateur (UX)<sup>46</sup> et la réduction de la charge mentale de travail<sup>47,48</sup> en situation d'interaction humain-machine. Parmi les approches étudiées, celle dite d'interface écologique fera l'objet d'une attention particulière.<sup>49,50</sup> Le but de telles interfaces est de rendre perceptivement évidentes à l'utilisateur les contraintes et les relations complexes constitutives de l'environnement de travail.

Les outils ne sont pas neutres,<sup>51</sup> ils permettent d'accompagner l'adoption de nouvelles méthodologies de travail. Les méthodes étudiées porteront notamment sur les pratiques agiles adoptées par l'industrie du génie logiciel et sur leur mise en place éventuelle dans le domaine de la construction. Nous étudierons en particulier comment la gestion itérative des modifications successives au projet (versioning) peut influencer l'organisation de la collaboration entre les différents acteurs d'un projet de construction.

Le processus présenté en figure 1 pourra évoluer vers une version allégée dont la figure 2 propose un exemple.

Question principale :

- Q0.0 : Comment réduire la charge cognitive liée à la gestion des contraintes en projet de construction ?

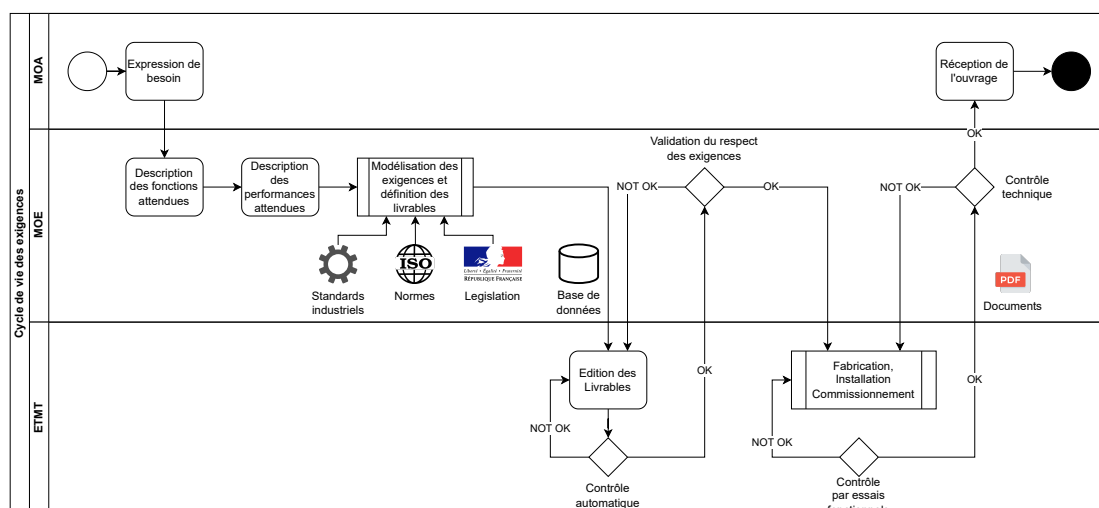
Questions complémentaires :

- Q0.1 : Comment créer un environnement de gestion des contraintes hétéroclytes ?
- Q0.2 : Comment décrire une contrainte en langage naturel ?

## 0.3 Objectifs et contributions

Présenter la double finalité de la recherche :

- scientifique : formaliser un modèle d'interface écologique pour l'aide à la décision sous contraintes;
- industrielle : proposer un outil expérimenté dans un contexte réel (EES / poste ferroviaire).



**FIGURE 2 :** Macro-processus de traitement des contraintes durant un projet de construction avec automatisation des vérifications d'études.

#### Retombées attendues

- **Côté laboratoire :** Les résultats attendus sont une méthode générique et une architecture de système sensible aux contraintes, ainsi que des données d'évaluation centrée utilisateur. Des publications scientifiques sont également attendues.
- **Côté entreprise :** Les résultats attendus sont l'application de la méthode proposée sur des cas spécifiques à l'entreprise, débouchant sur un prototype de système sensible aux contraintes. Des données d'évaluation technique sont aussi attendues.

**TABLE 1 :** Contributions scientifiques

Type	Contribution
Article de conférence	

## 0.4 Organisation du document



# 1 Exploration sectorielle (20p)

## 1.1 Introduction

(Okoli, Tranfield)

- **Contexte et problématique** : préciser le champ disciplinaire et la pertinence pratique/organisationnelle.
- **Objectif scientifique** : situer la revue comme méthode de recherche en soi, permettant de cartographier un champ et de développer une contribution conceptuelle (typologie, cadre théorique, taxonomie, agenda de recherche).
- **Pertinence managériale** : expliquer en quoi la revue éclaire les besoins des organisations et des acteurs.

## 1.2 Protocole de recherche

Research questions

RQ1

RQ2

Methode SPIDER

- **Sample (S)** : acteurs, organisations, secteurs étudiés (ex. entreprises, managers, équipes projets).
- **Phenomenon of Interest (PI)** : pratiques, processus, technologies, comportements managériaux étudiés.
- **Design (D)** : types de designs méthodologiques inclus (études de cas, enquêtes, analyses qualitatives, etc.).
- **Evaluation (E)** : indicateurs ou dimensions étudiées (performance, adoption, impacts organisationnels).
- **Research type (R)** : types de recherche acceptés (empirique, théorique, revue existante).

Research string

- Construction des équations avec opérateurs booléens et synonymes.

```
("knowledge management" OR "organizational learning") AND ("digital  
↪ transformation" OR "IT adoption")
```

Listing 1 : Requête générique

TABLE 2 : Déclinaison de la requête générique par bases de données ciblées

Name	Query
Scopus	
Web of Science	
Business Source Complete (EBSCO)	
ScienceDirect	
Google Scholar	

Littérature grise

- Rapports professionnels, thèses, working papers.
- Justification de l'inclusion ou exclusion.

Processus de sélection (Tranfield)

1. **Recherche initiale** → collecte des références.
2. **Déduplication.**
3. **Screening par titre et résumé.**
4. **Screening par texte intégral.**
5. **Validation inter-évaluateurs** (au moins deux chercheurs, résolution des désaccords par consensus).

Critères d'inclusion et d'exclusion

- Inclusion : articles académiques en gestion/SHS, période temporelle définie, pertinence thématique.
- Exclusion : non revu par les pairs (sauf gris justifié), hors champ, doublons.

Formulaire d'extraction (Okoli)

- Identifiant (ID)
- Référence bibliographique
- Contexte (secteur, pays, type d'organisation)
- Méthodologie de l'étude
- Résultats principaux
- Concepts/variables mobilisés
- Contribution théorique ou pratique

Évaluation de la qualité (Okoli)

- Pertinence théorique (forte/moyenne/faible).
- Validité méthodologique (forte/moyenne/faible).
- Clarté de la contribution.

### 1.3 Résultats de recherche

Nombre d'articles identifiés, filtrés, exclus, inclus.

**PRISMA 2020 flow diagram** for new systematic reviews which included searches of databases and registers only

- Présenter le flux : articles identifiés, retenus, exclus, inclus.
- Fournir la checklist 2020 PRISMA-RR (traçabilité).
- Appliquer les interim guidance pour les Rapid Reviews issues du groupe Cochrane : expliciter les écarts méthodologiques, les raccourcis, la justification de ces choix.
- Inclure un diagramme de flux (identification → sélection → inclusions) adapté au contexte RR.
- Intégrer les éléments de publication / éthique : auteurs, contributions, relecteurs, conflits d'intérêt.
- Mention explicite du fait que PRISMA-RR est en développement et que ce rapport est conforme aux principes provisoires.

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12013547> <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39038926> <https://www.equator-network.org/wp-content/uploads/2018/02/PRISMA-RR-protocol.pdf>

## 1.4 Analyses des résultats

- **Analyse descriptive** : nombre d'articles, évolution temporelle, répartition par journaux/-méthodes.
- **Analyse thématique** : regroupement des contributions en catégories conceptuelles.
- **Construction conceptuelle** : cadre, typologie, ou modèle explicatif.
- **Agenda de recherche** : identification des lacunes et pistes futures.

## 1.5 Discussion

- **Synthèse des apports** : résumé des résultats majeurs.
- **Implications théoriques** : enrichissement du corpus scientifique en gestion.
- **Implications pratiques** : recommandations pour les acteurs managériaux.
- **Limites méthodologiques** : biais de sélection, couverture des bases, etc. Risques de biais de publication, Risques liés à l'échantillonnage ou aux bases de données, Stratégies d'atténuation (diversification, double codage).
- **Perspectives** : agenda pour futures recherches.

## 1.6 Conclusion

## 2 Etat de l'art (80p)

### 2.1 Introduction

#### 2.1.1 Background

#### 2.1.2 Business rules

#### 2.1.3 Ecological interface design

### 2.2 Protocol de recherche

#### 2.2.1 Questions de recherche

Questions principales

**RQ1** Comment les principes de l'Ecological Interface Design ont-ils été appliqués à la représentation visuelle de règles métiers ou de systèmes de contraintes ?

**RQ2** Quelles approches conceptuelles, méthodologiques ou techniques ont été mobilisées pour rendre visibles ou compréhensibles les états d'une règle métier (valide, bloquée, inactive, en alerte, etc.) ?

**RQ3** Quels modèles cognitifs, ergonomiques ou informationnels ont été mobilisés pour adapter la visualisation des règles métiers au contexte d'usage (rôle utilisateur, environnement, phase de travail, niveau d'expertise, etc.) ?

Questions secondaires

**RQ4** Quels types de métaphores visuelles ou structures d'information ont été proposés pour représenter la complexité des interdépendances entre règles métiers (hiérarchie, causalité, propagation d'état) ?

**RQ5** Quels domaines applicatifs ont le plus exploré ces approches (ex. : systèmes industriels, ingénierie, santé, finance, administration, etc.) et dans quelles finalités (supervision, décision, audit, apprentissage) ?

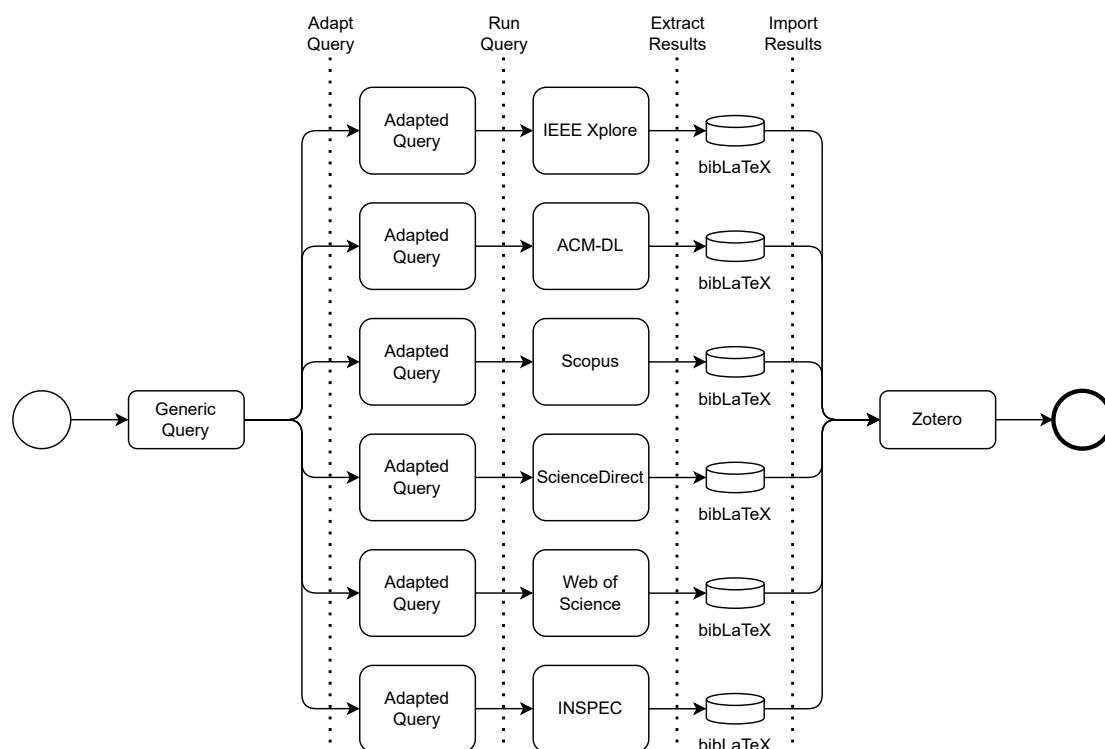
**RQ6** Quelles sont les limites identifiées dans la littérature concernant l'applicabilité des principes EID à des systèmes de règles dynamiques (ex. : règles générées, apprises, modifiées en temps réel) ?

**RQ7** Quels modèles d'évaluation (performance, charge cognitive, compréhension, décision) ont été employés pour mesurer l'efficacité de ces interfaces écologiques appliquées aux règles métiers ?

Element	Definition	Keywords
<b>Population</b>		
<b>Intervention</b>		ecological interface design, EID
<b>Comparison</b>	Non utilisé	
<b>Outcome</b>		
<b>Context</b>		

**Quality assessment criteria** Justification des choix de mots-clés.

L'identification des mots clés permet de préparer la requête des bases de données. Le processus de collecte est illustré par la figure 3.



**FIGURE 3 :** Processus de collecte des données

La requête booléenne générique intégrant les mots-clés issus du tableau ?? est présentée par le bloc de code 2. Sa structure suit l'ordre logique : **Population**  $\wedge$  **Intervention**  $\wedge$  **Outcome**  $\wedge$  **Context**.

Les bases de données interrogées sont :

1. IEEE Xplore
2. ACM Digital Library : The ACM Guide to Computing Literature collection
3. Scopus
4. ScienceDirect
5. Web of Science
6. INSPEC (via Engineering Village or ProQuest)

La requête générique est ainsi adaptée à chaque base de données et les variantes sont présentées par le tableau ??

Base de données	Requête
IEEE Xplore	"All Metadata":(("human-machine interface" OR "human computer interaction" OR "H
ACM-DL	("human-machine interface" OR "human computer interaction" OR "HMI" OR "HCI") A
Scopus	TITLE-ABS-KEY(("human-machine interface" OR "human computer interaction" OR "H
ScienceDirect	TITLE-ABS-KEY(("human-machine interface" OR "human computer interaction" OR "H
Web of Science	TS=(("human-machine interface" OR "human computer interaction" OR "HMI" OR "HC
INSPEC	(TI=("human-machine interface" OR "human computer interaction" OR "HMI" OR "HCI

Nous limitons la collecte d'articles à une profondeur de 10 ans soit entre le 2015-01-01 et le 2025-01-01. Seuls les articles de revues et de colloque en anglais, associés à l'interaction

```

-- POPULATION: Interfaces, cognition, visualization
("human-machine interface" OR "human computer interaction" OR "human
↳ centered interaction" OR "HMI" OR "HCI")
-- INTERVENTION: Ecological Interface Design
AND ("ecological interface design" OR "EID")
-- OUTCOME: cognitive and decision-related outcomes
AND ("situational awareness" OR "context sensitivity" OR "cognitive load"
↳ OR "usability" OR "mental workload" OR "user performance" OR "task
↳ performance" OR "error reduction" OR "cognitive efficiency")
-- CONTEXT: construction and engineering disciplines
AND ("construction industry" OR "civil" OR "structural" OR "geotechnical"
↳ OR "hydraulic" OR "transport" OR "mechanical" OR "plumbing" OR
↳ "sanitary" OR "HVAC" OR "heating" OR "ventilation" OR "air
↳ conditioning" OR "cooling" OR "climate" OR "environmental" OR
↳ "electrical" OR "power" OR "energy" OR "lighting" OR "acoustical" OR
↳ "thermal" OR "fire safety" OR "industrial" OR "maintenance" OR
↳ "construction management" OR "urban" OR "infrastructure")

```

**Listing 2 : Requête générique**

humain-machine sont retenus. Nous écartons les articles non revues par les pairs, les articles incomplets et ceux sans résultats empiriques. L'opération de déduplication est réalisée sur Zotero.

### 2.2.2 Processus de recherche

Recherche initiale → collecte des résultats → exportation (BibTeX, CSV). Déduplication (Zotero, EndNote, Mendeley, etc.).

Les articles sont préparés puis sélectionnés en suivant le processus présenté en figure [1]. Automatique (Action tag, plugin, etc.)

**Étape 1** Déduplication (merge-entries (:where (= :DOI :Title)))

**Étape 2** Filtration (delete-entries (:where (and (< :date "2015-01-01") (not (= :langue "en")))))

Mannuel systématique

**Étape 3** non revues par les pairs, incomplets, sans résultats empiriques.

Mannuel collégial

**Étape 4** filtrage par titre et résumé.

**Étape 5** filtrage par texte intégral.

**Étape 3** validation inter-évaluateurs (au moins deux chercheurs).

### 2.2.3 Formulaire d'extraction

Champs obligatoires : Identifiant (ID) Référence bibliographique complète Année de publication Contexte (population, domaine, technologie) Méthodologie de l'étude Résultats principaux (Outcome) Limites rapportées

#### **2.2.4 Évaluation de la qualité**

Checklist PRISMA, indiquer la localisation de chaque item dans le rapport final.

Checklist qualité (exemple) : Clarté des objectifs : oui/non Méthodologie décrite : oui/non

Données empiriques disponibles : oui/non Validité des résultats : élevé/moyen/faible

#### **2.2.5 Schéma de sélection**

Nombre d'articles identifiés, filtrés, exclus, inclus.

**PRISMA 2020 flow diagram** for new systematic reviews which included searches of databases and registers only

### **2.3 Analysis and results**

Méthodes d'analyse Quantitative (comptages, distributions, tendances temporelles). Qualitative (analyse thématique, catégorisation, taxonomie). Meta-analysis (si applicable).

### **2.4 Wrapping up**

#### **2.4.1 General discussion**

Contribution scientifique : Lacunes identifiées Etat de l'art consolidé. Contribution pratique : Recommandations Implications pour les chercheurs et praticiens. Limites méthodologiques du protocole.

#### **2.4.2 Recommendations**

### **2.5 Treats to validity**

Risques de biais de publication. Risques liés à l'échantillonnage ou aux bases de données. Stratégies d'atténuation (diversification, double codage).

### **2.6 Research opportunity**

### **2.7 Conclusion**

### **3 Problématique de recherche (20p)**

#### **3.1 Introduction**

Rappel : après l'état de l'art, une zone non résolue est identifiée (ex. gestion des contraintes via IHM écologiques). Objectif : transformer cette zone non résolue en une problématique scientifique explicite. Cadres mobilisés : Whetten, Alvesson & Sandberg, QQQQCCP, RCA.

#### **3.2 Définition de la problématique**

(Whetten, 1989) What : quels éléments précis posent problème (ex. multiplicité et incohérence des contraintes projet). How : comment ces éléments interagissent ou produisent des effets négatifs. Why : pourquoi il est crucial d'y répondre (enjeux théoriques + pratiques). Who / Where / When : quels acteurs, contextes, phases du projet sont concernés.

#### **3.3 Analyse critique**

(Problemization – Alvesson & Sandberg, 2011) Identifier les hypothèses dominantes dans la littérature (ex. "les contraintes sont gérables par les méthodes classiques de planification"). Montrer leurs limites ou leur obsolescence. Créer une tension : pourquoi ces hypothèses ne suffisent plus dans les environnements actuels. Reformuler la problématique comme une contradiction non résolue.

#### **3.4 Déclinaison opérationnelle**

(QQQQCCP / 5W1H) Quoi : description détaillée du problème organisationnel. Qui : acteurs directement et indirectement affectés. Où : environnement spécifique (projets complexes, systèmes socio-techniques). Quand : temporalité critique (conception, exécution, suivi). Comment : limites des solutions actuelles. Combien : ampleur mesurée (coûts, délais, incidents). Pourquoi : justification du caractère central du problème.

#### **3.5 Analyse des causes profondes**

(RCA / Ishikawa / 5 Why's) Identification des sources techniques, organisationnelles, cognitives. Mise en évidence de l'origine structurelle du problème : absence de cadre unifié pour gérer, résoudre et préserver les contraintes.

#### **3.6 Proposition de recherche**

Formulation claire, nette et précise de la problématique en une phrase : « Comment concevoir une pratique organisationnelle et un cadre outillé permettant de modéliser, résoudre et préserver les contraintes dans les projets complexes, en intégrant des interfaces écologiques adaptées aux acteurs ? »

Positionner cette formulation comme le pivot entre état de l'art et théorisation.



### **3.6.1 Questions de recherche**

Question principale : Comment développer une approche d'ingénierie par les contraintes pour améliorer la conception et la validation des systèmes de génie électrique ?

Questions secondaires :

- Quels mécanismes de vérification formelle intégrer dans cette approche ?
- Comment remonter aux utilisateurs [...] (IHM)
- Comment assurer la traçabilité des contraintes techniques ?
- Quelle est l'efficacité de cette approche comparée aux méthodes traditionnelles ?

### **3.6.2 Approche méthodologique**

## **3.7 Discussion**

Montrer que la problématique n'est pas une simple lacune, mais une tension théorique + enjeu pratique majeur. Mettre en évidence la valeur de cette problématique pour : les chercheurs (nouvelle théorie), les praticiens (nouveaux outils).

## **3.8 Conclusion**

Récapitulatif de la problématique formalisée. Insistance sur son rôle structurant pour la suite (théorisation → implémentation → évaluation).

## 4 Fondements théoriques (20p)

### 4.1 Méthodologie

#### 4.1.1 Stratégie de recherche

La stratégie repose sur la Design Science Research (DSR) (Hevner et al., 2004 ; Peffers et al., 2007 ; Gregor & Jones, 2007) comme ancrage principal pour construire une théorie de conception en gestion de projet. Elle est enrichie par :

- l'Action Design Research (ADR) (Sein et al., 2011) afin d'intégrer les utilisateurs dans la boucle de recherche,
- le cadre CIMO / Realist Evaluation (Pawson & Tilley, 1997 ; Denyer et al., 2008) pour structurer les mécanismes explicatifs,
- l'approche processuelle de Langley (1999) pour représenter la dynamique organisationnelle et ses évolutions.

#### 4.1.2 Socles théoriques

Théories des artefacts de conception et de l'action (DSR, ADR). Théories causales mécanistes (CIMO). Théorisation processuelle (Langley). Bases en sciences de gestion : routines organisationnelles (Pentland & Feldman), Knowledge Management (Nonaka, Davenport), interfaces écologiques (Vicente), théorie des jeux, graphes.

**TODO Théories de l'interface écologique** Décrire les principes de l'Ecological Interface Design (Vicente, 1999). Expliquer les notions de visibilité, affordance, abstraction hierarchy et situation awareness.

**TODO Sensibilité au contexte et cognition située** Définir les dimensions de contexte (utilisateur, tâche, environnement, système). Citer Dey & Abowd (2000), Kaptelinin & Nardi (2006), Hollnagel (2002).

**TODO Visualisation et interaction pour la négociation de contraintes** Présenter les approches de visualisation : overview + zoom + filter + details (Shneiderman, 1996). Décrire les besoins de représentation et d'interaction pour la compréhension et la négociation.

#### 4.1.3 Organisation

La méthodologie est organisée en quatre parties :

- Définition des objectifs (DSR + ADR)
- Principes de conception (DSR)
- Mécanismes causaux (CIMO)
- Dynamiques processuelles (Langley)

## 4.2 Définition des objectifs

- Structurer les objectifs de recherche en six étapes (problem identification, objectifs, design, démonstration, évaluation, communication).<sup>Peffer</sup>
- Garantir la pertinence (problèmes issus du terrain) et la rigueur scientifique (bases théoriques).<sup>Hevner</sup>
- Formuler les objectifs conjointement avec les praticiens, en laboratoire puis en contexte industriel.<sup>Sein</sup>

## 4.3 Principes de conception

Structuration des principes<sup>Gregor</sup> :

- But & portée : Développer une pratique organisationnelle de gestion de projet qui permet de modéliser, résoudre et préserver les contraintes, tout en assurant traçabilité, faisabilité et adaptation continue.
- Constructs : Acteur, rôle, objet-projet, contrainte, test, graphe de dépendances, mécanisme de propagation, événement, log, interface écologique.
- Principes de forme et de fonction (unicité, traçabilité, feedback en temps réel)
  - Unicité : une contrainte exprimée en langage contrôlé correspond à une méthode exécutable unique.
  - Traçabilité totale : lien continu du texte utilisateur jusqu'aux logs d'exécution.
  - Écologie de l'interface : feedback visuel et immédiat des contraintes et écarts.
- Principes d'implémentation (pipeline CNL → Graphe → Solveur → IHM)
- Traduction des objectifs en principes testables et en artefacts concrets (modèles, prototypes).
- Intégration de la co-construction (ADR) pour que ces principes soient ajustés en continu avec les utilisateurs.

Justificatory knowledge : S'appuie sur la littérature en routines organisationnelles, gestion des connaissances (SECI), écologie des interfaces (EID), planification par contraintes (TOC/-PERT/CPM), théorie des jeux et graphes.

## 4.4 Mécanismes causaux

Utilisation du cadre CIMO (Denyer et al., 2008 ; Pawson & Tilley, 1997) pour exprimer les mécanismes :

- Contexte (type de projet, maturité organisationnelle)
- Intervention (instanciation du graphe de contraintes, IHM écologique)
- Mécanisme (propagation, négociation, préservation via logs/tests)
- Outcome (réduction du temps de résolution, meilleure conformité, traçabilité accrue)

Exemple

Dans un projet à forte complexité contractuelle (C), l'instanciation d'un

## 4.5 Dynamiques processuelles

Théoriser les dynamiques organisationnelles.<sup>Langley</sup> Méthodes utilisées :

- Temporal bracketing (séquençage des phases contraintes/tests).
- Visual mapping (diagrammes Unified Model Language (UML), System Model Language (SysML), Business Process Model and Notation (BPMN) pour modéliser les processus).
- Narrative strategies (construction d’histoires organisationnelles reliant données empiriques et mécanismes théorisés).

Apport : démonstration que la pratique organisationnelle évolue par itérations, au-delà d’une simple modélisation statique.

## 4.6 Formulation finalisée de la théorie

(Design Theory Statement)

Conformément à Gregor & Jones (2007), la formulation finale de la théorie issue de l’étude peut être structurée en huit éléments. Ci-dessous un exemple de rédaction, que vous raffinerez ensuite à partir des résultats empiriques :

Proposition simple :

When working on a complex project, any actor will benefit from an ecologic

Théorie :

In complex projects (Where), actors with decision or coordination roles (W

## 4.7 Discussion

## 4.8 Conclusion

Le chapitre aboutit à une architecture de théorisation hybride et multi-niveaux : Macro-niveau (DSR/ADR) : définition et validation itérative d’une design theory. Mésos-niveau (CIMO) : formalisation des mécanismes causaux. Micro-niveau (Langley) : représentation des processus et routines dans le temps.

## 5 Taxonomie des contraintes (20p)

### 5.1 Définition de contrainte

À l'origine, contraindre et contrainte évoquent l'idée d'une pression exercée pour restreindre la liberté d'action d'une personne.<sup>52</sup> Dans le langage courant, une contrainte désigne tout ce qui force ou limite la liberté d'action.<sup>53</sup> Par extension, le mot s'applique à toute obligation ou règle à laquelle on doit se plier et qui réduit le champ de liberté.

En outre, certains domaines techniques ont des acceptions spécifiques du terme. En droit, une contrainte peut désigner un acte coercitif.<sup>53</sup> En mécanique, le mot contrainte sert à traduire l'anglais stress, soit une force appliquée à un matériau qui tend à le déformer.<sup>54</sup> Ces usages spécialisés gardent néanmoins l'idée commune de force appliquée ou de limite imposée.

Dans de nombreuses normes techniques et scientifiques, le terme contrainte est employé avec un sens plus formalisé, mais toujours avec l'idée centrale de restriction imposée :

- restriction de paramètres ou de degré de liberté (orientation, taille, position, proximité),<sup>55</sup>
- restriction attachée à un type de données,<sup>56</sup>
- condition formelle "exprimée en langage naturel ou dans un langage formel" qui précise ou limite la sémantique d'un modèle.<sup>57</sup>
- borne de l'espace de recherche de solutions<sup>56</sup> dans les systèmes experts.

En synthèse, qu'il s'agisse de géométrie, de données, de modélisation ou d'autres domaines, toutes ces définitions normatives s'accordent pour voir la contrainte comme un élément limitatif : c'est une condition, une règle ou un ensemble de paramètres qui restreignent les possibilités afin de satisfaire à des critères donnés. Une contrainte borne un espace (espace de tolérance, domaine de valeurs, comportement autorisé, etc.) **en écartant ce qui n'est pas admissible.**

Dans le domaine de l'ingénierie et de la gestion de projets de construction, on peut considérer la contrainte comme une notion englobant tous les éléments qui délimitent l'espace de solution d'un projet. Autrement dit, l'ensemble des facteurs qui, pris en compte conjointement, circonscrivent ce qu'il est possible ou acceptable de réaliser. Ces facteurs incluent :

- le contexte et les données d'entrée du projet :
  - les contraintes de site (encombrement, climat, sol),
  - les contraintes réglementaires et normatives (codes de construction, normes de sécurité),
  - les ressources disponibles (budget, délai imparti, main-d'œuvre)
- Les besoins à satisfaire
  - besoins explicitement formulés par le client ou les utilisateurs,
  - besoins implicites (non dits mais attendus)
- Les objectifs : niveau de performance ou un résultat à atteindre (par ex. efficacité énergétique visée, capacité fonctionnelle, niveau de qualité)
- Les exigences : condition à remplir ("le système doit faire X")
- Les spécifications : détaille les paramètres mesurables ("telle performance, telle dimension, tel standard à respecter")
- Les prescriptions techniques : impose les moyens à mettre en oeuvre (un équipement, un composant, un matériau).

En somme, toute condition à satisfaire, qu'elle provienne du contexte, d'un besoin, d'une règle ou d'un choix stratégique, constitue une contrainte du projet. Cette vision rejoint la définition mathématique d'une contrainte comme condition que doit satisfaire la solution d'un problème,

la solution admissible étant celle qui respecte l'ensemble des contraintes. Dans un projet, les contraintes dessinent ainsi les frontières de l'acceptable : elles forment un cadre à l'intérieur duquel l'équipe de conception doit trouver sa liberté de manœuvre. Ainsi nous pouvons définir :

Expression d'une condition, limitation ou obligation, formulée en langage naturel, qui restreint l'espace des solutions possibles afin de garantir que la solution retenue soit conforme au contexte (légal, social, sociétal, environnemental, économique et technique) du projet.

**Synonymes :** besoin, objectif, spécification, exigence.

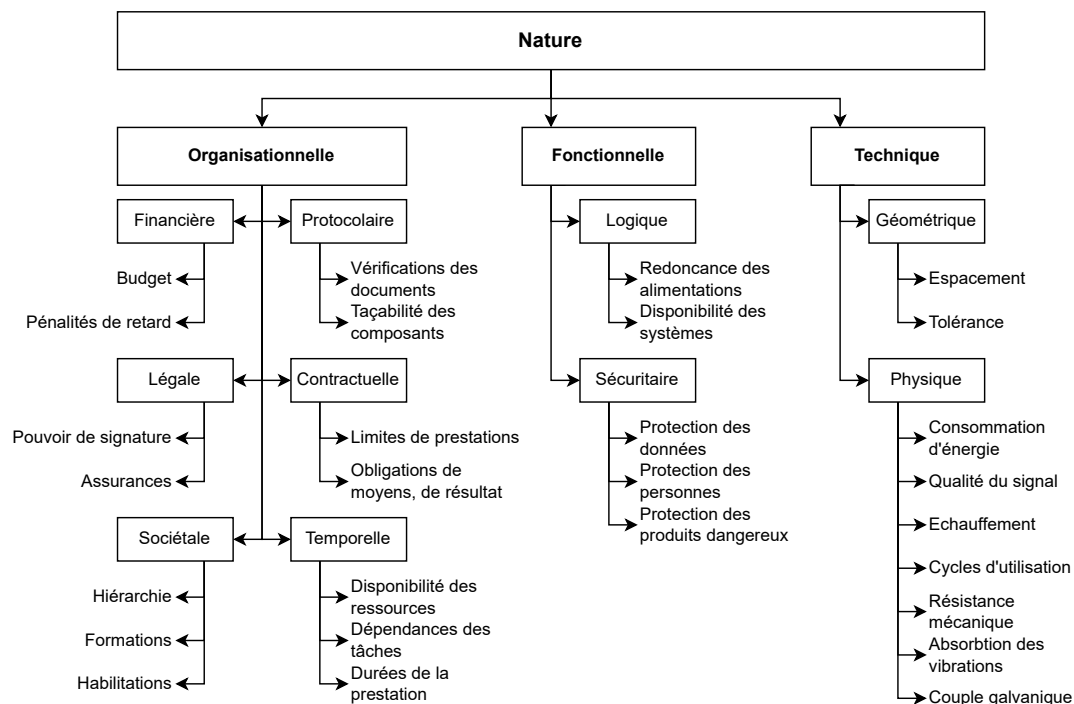
Par cette définition, la notion de contrainte reste agnostique du cycle de vie du projet. Qu'il s'agisse de la phase de planification, de conception, de réalisation ou d'exploitation, les contraintes forment le fil directeur immuable auquel se référer pour prendre les bonnes décisions.

## 5.2 Taxonomie des contraintes

Illustrer chaque catégorie de contrainte par des exemples précis

expliquer le périmètre de contrainte de la thèse

La littérature distingue plusieurs dimensions pour classer les contraintes :



**FIGURE 4 :** Hierarchie des contraintes

Justifier le besoin d'une "méthode de rédaction générique".

### 5.2.1 TODO Contraintes dans l'électrotechnique

Présenter les contraintes spécifiques aux systèmes électriques (IEC 60364, NF C15-100, sécurité, synchronisation). Donner un exemple concret (poste de transformation).

## 5.3 Cycle de vie des contraintes

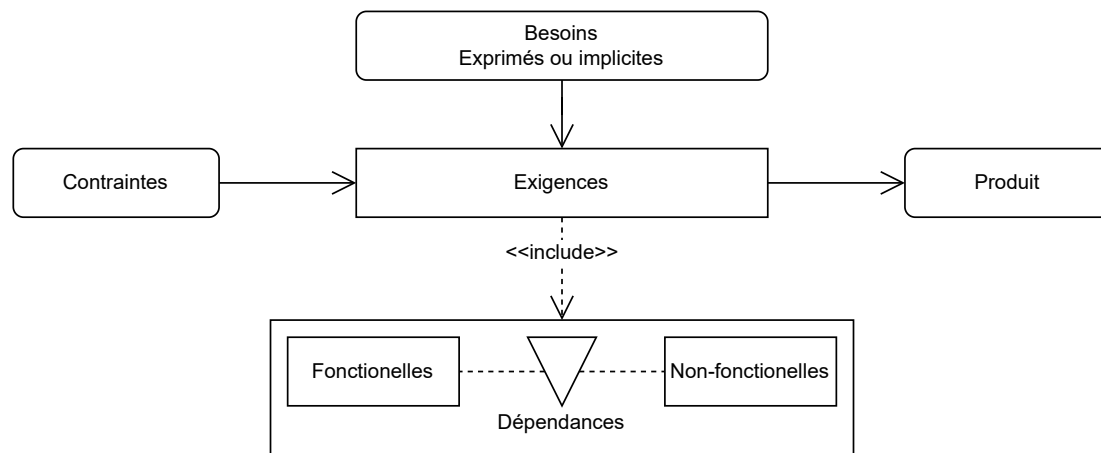
### 5.3.1 TODO Exercice des contraintes

expliciter le cycle de vie des contraintes

Dans l'industrie de la construction, les parties prenantes se coordonnent dans la réponse à des exigences exprimées. Cette gestion des exigences vise l'atteinte des objectifs du client en respect des contraintes légales, réglementaires et normatives.

Les exigences sont déterminées à partir des besoins des parties prenantes et des contraintes comme les conditions d'utilisation, les ressources et la législation. – NF EN 60300-1:2014<sup>58</sup>

La relation entre exigences et contraintes est représentée par la 5. Ainsi, une exigence est une spécification d'un besoin tenant compte des contraintes du domaine d'étude. Cependant, la limite est souvent floue entre un besoin, une contrainte et une exigence. Les professionnels de la construction ont donc tendance à les mélanger.



**FIGURE 5 :** La relation entre contraintes et exigences selon l'ISO 60300-1<sup>58</sup>

Une matrice de traçabilité des exigences est employée pour réaliser le suivi des exigences. Elle se matérialise par un tableau ou un document qui relie les exigences d'un projet aux livrables, tâches, jalons ou tests qui les satisfont. Son objectif principal est de garantir que toutes les exigences sont couvertes par les plans du projet et qu'aucun besoin n'est négligé. Elle permet également de vérifier l'impact des modifications d'exigences, facilitant la gestion des changements.

Élaboration de la matrice :

1. Collecte des exigences : rassembler toutes les exigences du projet, qu'elles proviennent du cahier des charges, des réunions avec les parties prenantes, d'autres documents de projet ainsi que des textes institutionnels applicables.

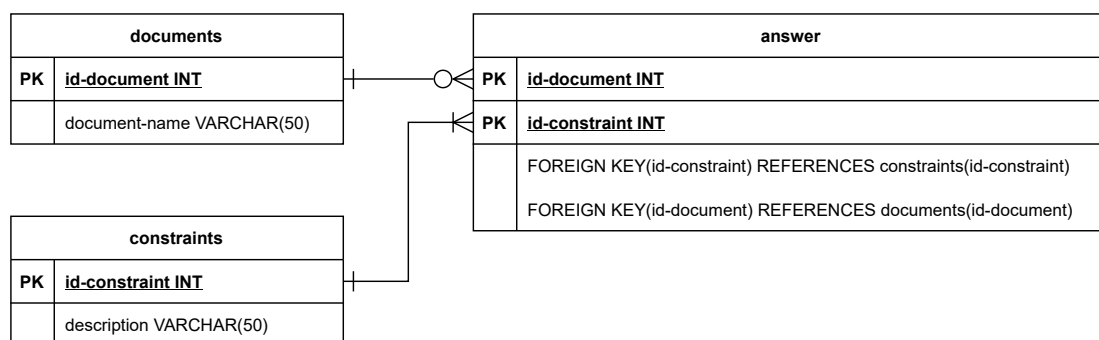
2. Identification des livrables : Listez tous les livrables du projet, y compris les rapports, les documents, le code source, les schémas, les maquettes numériques, les plans, etc.
3. Préparer la matrice : la première colonne source les exigences et la première ligne source les livrables. La première cellule (eg. A1:A1) est laissée vide.
4. Affecter les livrables aux exigences : Une croix est inscrite à l'intersection de chaque exigence devant être respectée ou vérifiée par un livrable. Un livrable peut être affecté à plusieurs exigences et une exigence peut nécessiter plusieurs livrables pour être vérifié. Cette étape nécessite une compréhension approfondie du projet et une collaboration étroite avec les équipes techniques.

Utilisation de la matrice :

- Vérification de la couverture des exigences : la matrice permet de s'assurer que chaque exigence est adressée par au moins un livrable, réduisant ainsi le risque d'omissions.
- Gestion des changements : Lorsque des modifications sont apportées à une exigence, la matrice facilite l'identification des livrables impactés, aidant à évaluer l'ampleur et l'impact du changement sur le projet.
- Communication avec les parties prenantes : La matrice fournit une vue d'ensemble claire qui peut être utilisée pour communiquer l'avancement du projet et la manière dont les exigences sont satisfaites, renforçant la confiance des parties prenantes.
- Facilitation des tests : En liant les exigences aux cas de test, la matrice aide à s'assurer que tous les aspects du système sont correctement testés, contribuant à la qualité du produit final.

La matrice de traçabilité des exigences est un document vivant qui **doit être régulièrement mis à jour tout au long du projet**. Les ajouts, les suppressions ou les modifications d'exigences, ainsi que l'évolution des plans de livrables, doivent être reflétés dans la matrice pour maintenir sa précision et sa pertinence. Elle est employée en complément d'une liste des documents exécutés par le prestataire.

La nature de sa composition s'apparente à une table de jonction d'une base de donnée relationnelle tel que pourrait définir, sous forme de MLD la figure 6.



**FIGURE 6 : MLD - Association des exigences aux livrables**



## 5.4 Impact sur la charge cognitive

### 5.4.1 TODO Médiums et volumétrie

expliciter la problématique : taille du corpus, diversité des sources, silotage des rédactions (pas de travail conjoint entre les organismes producteurs de contraintes), difficulté d'en connaître, etc.

Sources, origines et finalités

Brevets, Normes, Législation, Contrats, Jurisprudences...

Volume conséquent => faire un compte du nombre de pages par domaine pour illustrer la problématique.

Règlementations	Séries de Normes	Cycle de vie	Acteurs	Documentation	SI (Legacy)
AQ84	ISO 9000	Faisabilité	Maitrise d'ouvrage (MOA)	Cahier des charges	ERP
	ISO 14000	Esquisse	Assistant MOA	Spécification	SIRH
	ISO 27000	Concours	Maitrise d'oeuvre (MOE)		PPM
	ISO 31000	Avant Projet Sommaire	ETMT		PLM
		Avant Projet Définitif	Mainteneur (FM)		GMAO
		Projet	Gestionnaire d'actif (PM)		IWMS
		Consultation (DCE)	Propriétaire	[...]	CRM
		Execussion	Locataire		GED
		Commissionnement			CDE
		DOE			
		Gestion, Exploitation et Maintenance		PV Essais d'ensemble	
		Démantèlement			

FIGURE 7 : Proposition de représentation des environnements de contraintes

voie de recherche possible : création d'un service de fourniture de contrainte standardisé et unifié appellable via des requettes API

### 5.4.2 TODO Environnement multi-acteur

Décrire la multiplicité des acteurs et la complexité des interactions. Présenter les risques d'asymétrie d'information et la charge cognitive associée. Relier à la théorie de la cognition distribuée (Hutchins, 1995).

## 5.5 Cadre de travail

on pose ici les 3 composantes du projet de recherche lié aux contraintes

Les contraintes étant centraux à la caractérisation d'un ouvrage, il convient de définir un cadre de travail rigoureux permettant leurs manipulation.

Ce cadre doit posséder à minimum 3 composantes :

- Modélisation : formulation, négociation et amélioration des contraintes;
- Résolution : vérification de l'espace de solution, contrôle automatisé du respect des contraintes;

— Préservation : suivi des évolutions, association contextuelle, recherche d'information, etc. Modélisation des contraintes : c'est l'activité de formulation et de négociation des contraintes en amont et au fil du projet. Il s'agit d'identifier clairement toutes les contraintes pertinentes (contextuelles, contractuelles, techniques...), de les exprimer de façon non ambiguë (rédaction dans le cahier des charges, spécifications, notes de calcul, modèles UML, etc.) et de s'assurer qu'elles sont comprises et acceptées par les parties prenantes. La modélisation inclut éventuellement la négociation de certaines contraintes : par exemple discuter d'une tolérance plus large si une exigence s'avère trop restrictive par rapport au coût, ou reformuler un besoin implicite en exigences explicites testables. Un bon modèle de contraintes se veut complet, traçable et partagé par tous, servant de référence commune.

Résolution des contraintes : ce volet recouvre la satisfaction effective des contraintes lors de la recherche de solution et de la réalisation du projet. Il s'agit d'abord de procéder à la résolution du problème en trouvant un espace de solution qui respecte l'ensemble des contraintes identifiées – en d'autres termes, vérifier qu'il existe au moins une solution faisable (vérification de la non-surcontrainte). Ensuite, on s'assure du juste niveau de contrainte : éviter d'ajouter des contraintes inutiles ou trop sévères qui surcontraindraient le projet par rapport au besoin réel. Cela implique une optimisation : assez de contraintes pour rencontrer le besoin et les objectifs, mais pas au point d'éliminer des solutions viables ou d'alourdir le projet inutilement. Enfin, ce volet inclut la vérification du respect des contraintes tout au long des études et de l'exécution – par des revues de conception, des simulations, des prototypes ou des tests. Chaque décision technique ou modification doit être évaluée au prisme des contraintes : si une solution envisagée viole une contrainte (par exemple une charge dépassant la contrainte de poids maximal), il faut soit l'ajuster, soit envisager de redéfinir la contrainte si cela est justifié et approuvé.

Préservation des contraintes (capitalisation) : au-delà du respect ponctuel, il est crucial de préserver la mémoire des contraintes du projet et de leur évolution. Ce troisième volet consiste à historiser et documenter les contraintes, leurs justifications d'origine, et les éventuelles modifications apportées en cours de route (assouplissements, ajouts, suppressions), de sorte que l'on sache à tout moment pourquoi telle contrainte a été posée et pourquoi tel choix de conception a été fait en conséquence. Cette traçabilité garantit la cohérence du projet sur la durée et facilite la maintenance ou les évolutions futures. Par exemple, conserver dans un registre ou une base de connaissance le raisonnement ayant conduit à une contrainte particulière (issue d'une norme, d'un retour d'expérience, d'une demande client spécifique...) permettra, des années plus tard, à un nouvel intervenant de comprendre le rationnel de conception. La préservation des contraintes et de leur historique de négociation contribue ainsi à une gestion de configuration rigoureuse et à l'amélioration continue du référentiel de conception de l'entreprise.

En conjuguant ces trois dimensions, on dote la notion de contrainte d'un véritable cadre de gestion sur le projet en respectant la définition 5.1.

### **5.5.1 TODO Méthodes de traitement**

Langage naturel :

- Rédaction
- Affectation (par des tableaux et matrices)
- Relecture (sur la base de listes à puces, checklist)
- Simulations (éventuellement mais loop sur rapport produit)

- Model checking : vérification exhaustive d'états finis, non systématique à date et loop sur rapport produit

## **5.6 Conclusion**

## **6 Proposition (80p)**

### **6.1 Méthodologie de conception**

#### **6.1.1 TODO Conception orientée par le domaine**

#### **6.1.2 TODO Conception centrée utilisateur**

Décrire la démarche UCD (ISO 9241-210) appliquée au projet : itérations, co-design, implication des acteurs.

#### **6.1.3 TODO Adaptation des méthodes agiles**

Présenter l'articulation entre Scrum et les processus de modélisation. Identifier les correspondances : sprint ↔ phase, backlog ↔ liste de contraintes.

#### **6.1.4 TODO Développement piloté par les comportements**

Décrire les modalités d'évaluation :

- Tests utilisateurs : SUS, NASA-TLX
- Mesures : temps, précision, charge cognitive
- Outils : enregistrements, questionnaires, logs.

### **6.2 Architecture logicielle**

#### **6.2.1 Choix technologiques**

#### **6.2.2 Modules principaux**

#### **6.2.3 Tests unitaires et d'intégration**

### **6.3 Conclusion**

## 7 Protocol expérimental (15p)

### 7.1 Fondements méthodologiques

Ce protocole s'appuie sur deux cadres théoriques principaux :

- **Cognitive Load Theory** (Sweller, 1988) — la performance dépend du niveau de charge cognitive induite par l'interface et la tâche.
- **Neuroergonomie** (Parasuraman & Rizzo, 2007) — mesure de l'efficacité cérébrale et physiologique de l'interaction homme-machine.

Objectif général : évaluer l'impact du prototype QuickMotion sur la rapidité et la fiabilité de la réalisation des tâches par rapport à une interface de référence.

### 7.2 Questions de recherche

- **Q1** : Le prototype permet-il de résoudre les problèmes plus rapidement ?
- **Q2** : Le prototype permet-il de réduire le nombre d'erreurs ?

### 7.3 Périmètre des essais

#### 7.3.1 Constitution des groupes de participants

**TABLE 3** : Constitution des groupes de test et des finalités recherchées

	Population	Taille	Localisation	Phase	Fin
G1	Équipe de recherche	3	Laboratoire	Concept	Vali
G2	Membres du laboratoire	5	Laboratoire	Pilote	Aju
G3	Groupe contrôle	8	Locaux du partenaire	Pilote	Cal
G4	Groupe caractérisé	24 pers. (2 conditions) → 48 obs.	Centre de formation	Principale	Obj
G5	Plateforme libre d'accès	Variable (≥500 jusqu'à >20k)	En ligne	Test A/B	Rep

Principes de planification

- **G1 → G3** : conception et calibration des instruments.
- **G4** : étude principale en plan intra-sujets (chaque participant teste les deux interfaces, ordre contrebalancé).
- **G5** : étude à large échelle, randomisation 1:1 (version A/B), analyse séquentielle selon le nombre effectif de participants.

#### 7.3.2 Données à collecter

#### 7.3.3 Instruments et logiciels

- **Montre connectée** : Redmi Watch 5 Lite (~40 €/u)
- **Webcam** : HD ≥1080p, 30 fps
- **Logiciels** :
  - **Eye-tracking** : logiciel libre de suivi du regard (par ex. WebGazer . js ou OpenFace)
  - **Randomisation A/B** : module serveur interne (tirage pseudo-aléatoire 1:1)

**TABLE 4 : Synthèse des données collectées**

ID	Caractéristique	Mesure	Moyen de collecte	Groupe
D1	Performance	Temps de complétion	Chronométrie embarquée	G1-C
D2	Performance	Nombre d'erreurs	Compteur d'événements	G1-C
D3	Utilisabilité	Navigation	Changement d'écran	G1-C
D4	Utilisabilité	Nombre de clics	Logger embarqué	G1-C
D5	Utilisabilité	Entrées clavier	Logger embarqué	G1-C
D6	Physiologique	Fréquence cardiaque	Montre connectée Redmi Watch 5 Lite	G1-C
D7	Physiologique	SpO <sub>2</sub>	Montre connectée	G1-C
D8	Physiologique	Mouvements oculaires	Webcam + eye-tracker logiciel	G1-C
D9	Physiologique	Ondes cérébrales (EEG, optionnel)	Casque EEG léger	G3-C
D10	Perceptuelle	Charge subjective	SWAT (Reid & Nygren, 1988)	G1-C
D11	Perceptuelle	Charge de tâche	NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988)	G1-C
D12	Perceptuelle	Acceptabilité	SUS ou UMUX-Lite	G1-C
D13	Qualitative	Stratégie, obstacles, raisons	Entretiens semi-directifs	G1-C

- **Questionnaires** : formulaires intégrés (Google Forms ou LimeSurvey)
- **Agrégation** : Prometheus

## 7.4 Analyse statistique

Hypothèses

- $H_0$  : aucune différence entre A et B.
- $H_1$  : le prototype (B) améliore les performances (temps, erreurs).

Tests

- **Temps de complétion** → Wilcoxon rangs signés (intra) ou Mann-Whitney (inter).
- **Nombre d'erreurs** → McNemar (intra) ou  $\chi^2$ /Fisher (inter).
- **Scores questionnaires** → tests non paramétriques équivalents.

Indices

- Effet moyen : **Cohen's d** ou **r de rangs**.
- Intervalle de confiance 95 % pour chaque différence.

### 7.4.1 Seuils statistiques

Paramètres

- $\alpha = 0.05$ ; puissance = 0.80; allocation 1:1.
- Unité d'analyse : utilisateur unique.

Interprétation selon taille effective ( $N_{\text{total}}$ )

Ces seuils déterminent les limites des interprétations réalisables au regard du nombre de participants constituant le groupe G5.

Lecture a posteriori

1. Calculer  $\hat{p}_A, \hat{p}_B, \Delta = \hat{p}_B - \hat{p}_A$
2. Estimer IC95 % (méthode de Newcombe)
3. Interpréter :

**TABLE 5 :** MDE (Minimal Detectable Effect) selon taille d'échantillon

N_total	n/bras	MDE@pA=20%	MDE@pA=50%	Interprétation
200	100	26.0 pp	26.7 pp	Détecte seulement gros effets
500	250	15.8 pp	17.4 pp	Effets massifs
1,000	500	10.9 pp	12.4 pp	Gros effets
2,000	1,000	7.5 pp	8.8 pp	Effets moyens
4,000	2,000	5.2 pp	6.2 pp	Effets modestes
10,000	5,000	3.3 pp	4.0 pp	Effets faibles
20,000	10,000	2.3 pp	2.8 pp	Petits effets
100,000	50,000	1.0 pp	1.25 pp	Très petits effets

- Si  $0 \notin \text{IC95 \%}$  et  $|\Delta| \geq \text{MDE} \rightarrow$  effet établi.
- Si  $0 \notin \text{IC95 \%}$  et  $|\Delta| < \text{MDE} \rightarrow$  effet réel mais faible.
- Si  $0 \in \text{IC95 \%} \rightarrow$  résultat inconclusif.

4. Reporter toujours IC95 % et borne supérieure de  $\Delta$ .

Règles d'arrêt

- **Succès** : premier palier où  $0 \notin \text{IC95 \%}$  et  $|\Delta| \geq \text{MDE}$ .
- **Futilité** :  $|\Delta| + \text{marge plausible} < \text{MDE} \rightarrow$  arrêt.
- **Sécurité** : arrêt si indicateur d'erreur ou fatigue dépasse seuil.

## 7.5 Organisation des essais

### 7.5.1 Contrôles et biais anticipés

- **Randomisation / contrebalancement** : neutraliser effets d'ordre.
- **Masquage** : expérimentateur aveugle à la version présentée.
- **Effet observateur / Hawthorne** : temps d'adaptation avant mesure, consignes neutres.
- **Demand characteristics** : hypothèses dissimulées.
- **Filtrage aberrants** : sessions <5e ou >95e percentile, abandons.
- **Biais évaluateur** : double codage et audits croisés.
- **Attrition** : compensation équitable et sessions courtes.
- **Contrôle matériel** : même environnement, machine, luminosité.
- **Familiarisation** : un essai non mesuré.

### 7.5.2 Déroulement expérimental

- Phase G1–G3 : validation des tâches, étalonnage des instruments, estimation des variances.
- Phase G4 : session en plan croisé AB/BA (ordre contrebalancé). 1 essai d'entraînement non mesuré avant chaque condition.
- Phase G5 : randomisation automatique des utilisateurs vers A ou B. Données loguées serveur (horodatage, succès, erreurs, métriques comportementales).

## 7.6 Synthèse et limites

Limites prévues

**TABLE 6 : Réponses attendues**

Question	Indicateur principal	Réponse attendue	Test prévu
Q1	Temps de complétion	$B < A$	Wilcoxon ou Mann-Whitney
Q2	Nombre d'erreurs	$B < A$	McNemar ou $\chi^2$ /Fisher
—	Charge perçue (NASA-TLX)	$B < A$	Test non paramétrique
—	Acceptabilité (SUS)	$B > A$	Test non paramétrique

- Variabilité individuelle élevée (temps, stress) → moyennes pondérées ou normalisation intra-sujet.
- Données physiologiques sensibles aux artefacts → exclusion si signal <70 % qualité.
- Étude A/B soumise à biais d'échantillon si recrutement libre.

Perspective Les résultats des phases G1–G4 permettront d'ajuster le prototype et d'estimer les paramètres statistiques réels (écarts types, proportions d'erreurs). Ces estimations alimenteront le calcul de puissance pour G5 et orienteront la décision de passage à une expérimentation de grande échelle ou à une version stable du prototype.

## 7.7 Conclusion



## **8 Validation expérimentale (50p)**

### **8.1 Cas d'étude 1 :**

#### **8.1.1 TODO Présentation du cas d'étude**

Décrire le contexte du poste de transformation ferroviaire. Lister les acteurs impliqués, leurs rôles et contraintes spécifiques.

#### **8.1.2 TODO Déploiement du prototype**

Décrire l'architecture logicielle : pipeline CNL → Graph → Solveur → IHM. Identifier les flux, les technologies, et le protocole d'observation.

#### **8.1.3 TODO Collecte et analyse des données**

Présenter la méthodologie d'analyse mixte (quantitative et qualitative). Décrire les indicateurs de performance et les observations comportementales.

#### **8.1.4 TODO Validation expérimentale**

Présenter les résultats et la discussion. Évaluer l'efficacité du prototype : charge cognitive réduite, détection d'incohérences, traçabilité accrue.

### **8.2 Cas d'étude 2 :**

#### **8.2.1 TODO Présentation du cas d'étude**

Décrire le contexte du poste de transformation ferroviaire. Lister les acteurs impliqués, leurs rôles et contraintes spécifiques.

#### **8.2.2 TODO Déploiement du prototype**

Décrire l'architecture logicielle : pipeline CNL → Graph → Solveur → IHM. Identifier les flux, les technologies, et le protocole d'observation.

#### **8.2.3 TODO Collecte et analyse des données**

Présenter la méthodologie d'analyse mixte (quantitative et qualitative). Décrire les indicateurs de performance et les observations comportementales.

#### **8.2.4 TODO Validation expérimentale**

Présenter les résultats et la discussion. Évaluer l'efficacité du prototype : charge cognitive réduite, détection d'incohérences, traçabilité accrue.

## 8.3 Cas d'étude 3 :

### 8.3.1 TODO Présentation du cas d'étude

Décrire le contexte du poste de transformation ferroviaire. Lister les acteurs impliqués, leurs rôles et contraintes spécifiques.

### 8.3.2 TODO Déploiement du prototype

Décrire l'architecture logicielle : pipeline CNL → Graph → Solveur → IHM. Identifier les flux, les technologies, et le protocole d'observation.

### 8.3.3 TODO Collecte et analyse des données

Présenter la méthodologie d'analyse mixte (quantitative et qualitative). Décrire les indicateurs de performance et les observations comportementales.

### 8.3.4 TODO Validation expérimentale

Présenter les résultats et la discussion. Évaluer l'efficacité du prototype : charge cognitive réduite, détection d'incohérences, traçabilité accrue.

## 8.4 Analyse des résultats

### 8.4.1 Descriptions

- Analyse de contenu détaillée : En appliquant la méthode d'analyse de contenu au corpus (selon Bardin, par exemple), on poursuit après le codage avec le comptage et la description des thèmes identifiés. Il s'agit de quantifier la fréquence d'apparition de chaque type de problème ou de commentaire pour évaluer leur importance relative. <https://journals.openedition.org/ripes/2996#:~:text=n%C3%A9gociation%20entre%20ses%20croyances%20propres,Ces%20derni%C3%A8res%20peuvent>

### 8.4.2 Interprétations

- Outils d'analyse qualitative : On peut recourir à des outils informatiques pour faciliter le traitement des données textuelles (par ex. le logiciel RQDA sous R, comme dans l'étude de Charotfylaka et al. <https://journals.openedition.org/ripes/2996#:~:text=n%C3%A9gociation%20entre%20ses%20croyances%20propres,Ces%20derni%C3%A8res%20peuvent>, ou un logiciel d'analyse qualitative tel que NVivo, Atlas.ti, etc.). Ces outils permettent de coder des segments de texte, de regrouper par thème et d'extraire toutes les citations liées à un thème donné, ce qui accélère l'analyse tout en la rendant traçable.
- Utilisation du schéma de Barnum : D'après Barnum (domaine de l'ergonomie IHM), une bonne triangulation en évaluation d'interface consiste à comparer trois volets : (1) les mesures de performance objectives, (2) les mesures subjectives (questionnaires, interviews) et (3) la liste des problèmes d'utilisabilité identifiés <https://cs4760.csl.mtu.edu/>

2020/lectures/usability-testing/#:~:text=Barnum%20suggests%20triangulat%20analysis%20which,is%20a%20comparison%20of.

- Illustration par des exemples : Pour rendre la description des résultats vivante et compréhensible, on prendra soin d'intégrer dans le rapport final des exemples concrets tirés des données qualitatives.

**TABLE 7 :** Matrice de validation expérimentale — IHM écologique et gestion des contraintes

ID	Variable indépendante (manipulée)	Variable dépendante (mesurée)	Type d'évaluation	Instrument
----	-----------------------------------	-------------------------------	-------------------	------------

## 8.5 Conclusion

## 9 Discussion et perspectives (15p)

### 9.1 Analyse des contributions

#### 9.1.1 Contributions théoriques

#### 9.1.2 Contributions méthodologiques

- Protocole d'évaluation centré utilisateur

#### 9.1.3 Contributions pratiques

- Modèle d'IHM écologique sensible aux contraintes
- Prototype validé en environnement réel

### 9.2 Limites et recommandations

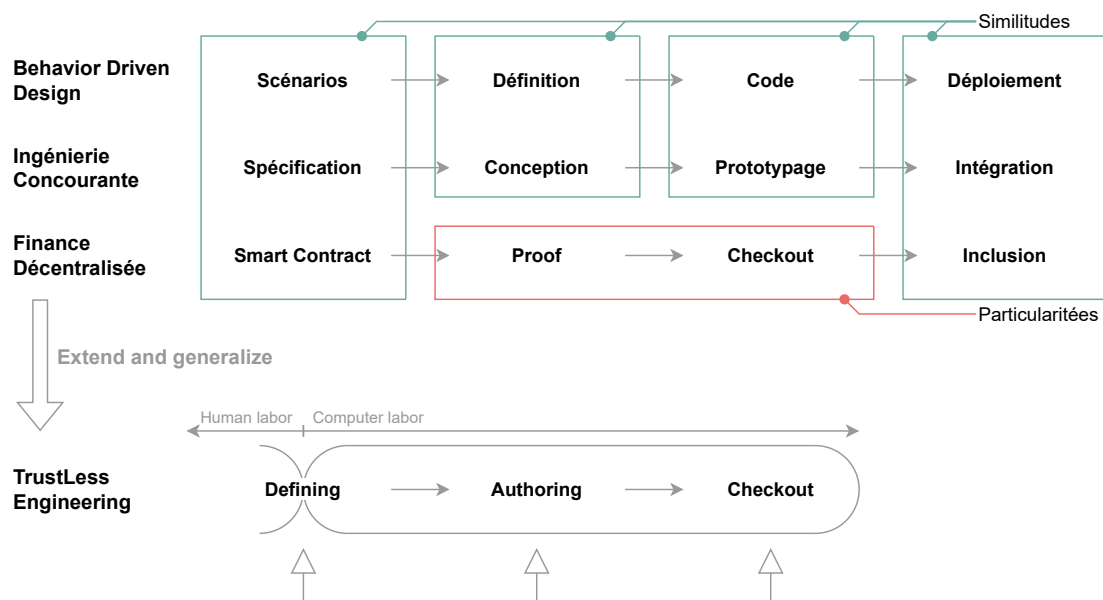
#### 9.2.1 Limites théoriques

#### 9.2.2 Limites pratiques

#### 9.2.3 Recommandations

### 9.3 Perspectives et opportunités

#### 9.3.1 Extensions théoriques



**FIGURE 8 :** Vers une ingénierie sans confiance ?

### **9.3.2 Opportunités de recherche**

- IA
- Block Chain
- Solveur de contrainte
- Analyse statique du texte (NLP)
- Intégration dynamique d'ontologies métiers

### **9.3.3 Transfert technologique**

à d'autres industries, à la fabrique de la norme et de la législation...

## **9.4 Impact scientifique et industriel**

### **9.4.1 Impact sur la recherche**

### **9.4.2 Impact industriel**

### **9.4.3 Impact sociétal**

Discuter de la faisabilité et des implications de la refonte de la filière.

## 10 Conclusion générale (10p)

Synthèse des contributions

Contribution théorique majeure

Innovation méthodologique

Validation expérimentale

Réponse à la question principale

Réponse à la questions secondaires

Perspectives d'avenir

[!Info] Commentaire prospectif sur l'ouvrage et ses conclusions

Espérer une évolution des plateformes d'accès aux normes (cobaz) pour simplifier la configuration des environnements de travail (NF EN etc. et gestion des exigences)

L'avenir, un terrain fertile pour l'ingénierie intégrée?

Les futures ruptures technologiques (?)

## 11 Références du document

### 11.1 Liste des figures

1	Macro-processus de traitement des contraintes durant un projet de construction.	10
2	Macro-processus de traitement des contraintes durant un projet de construction avec automatisation des vérifications d'études. . . . .	15
3	Processus de collecte des données . . . . .	20
4	Hierarchie des contraintes . . . . .	29
5	La relation entre contraintes et exigences selon l'ISO 60300-1 <sup>58</sup> . . . . .	30
6	MLD - Association des exigences aux livrables . . . . .	31
7	Proposition de représentation des environnements de contraintes . . . . .	32
8	Vers une ingénierie sans confiance? . . . . .	43

### 11.2 Liste des tableaux

1	Contributions scientifiques . . . . .	15
2	Déclinaison de la requête générique par bases de données ciblées . . . . .	16
3	Constitution des groupes de test et des finalités recherchées . . . . .	36
4	Synthèse des données collectées . . . . .	37
5	MDE (Minimal Detectable Effect) selon taille d'échantillon . . . . .	38
6	Réponses attendues . . . . .	39
7	Matrice de validation expérimentale — IHM écologique et gestion des contraintes	42

### 11.3 Liste des codes sources

## Listings

### 11.4 Liste des glosses

### 11.5 Liste des acronymes

#### B

**BPMN** Business Process Model and Notation 27

**BOS** Building Operating System 8, 8

**BIS** Building Information System 8, 8

**BIM** Building Information Modeling 7, 7, 7, 8, 8, 8, 8, 8, 13, 13, 14

#### E

**ETMT** Entreprise Titulaire d'un Marché de Travaux 10

#### G

**GTC** Gestion Technique Centralisée 12

**GTB** Gestion Technique du Bâtiment 12

**GED** Gestion Electronique des Documents 9, 9, 9, 9, 9

**I**

**IoT** Internet of Things 12

**IDS** Information Delivery Specifications 9

**ICS** International Classification for Standards 54, 54, 54

**ICE** Integrated Concurrent Engineering 8, 8, 8

**L**

**LOIN** Level Of Information Need (ISO 19650) 7

**M**

**MPLS** Multiprotocol Label Switching 12

**MOE** Maitrise d'Œuvre 9

**MOA** Maitrise d'OuvrAge 9

**S**

**SysML** System Model Language 27

**SCADA** Système de Contrôle et d'Acquisition de Données 12

**U**

**UML** Unified Model Language 27, 33

**V**

**VDI** Voix, Données et Images 12

**VDC** Virtual Design and Construction 8, 8, 8, 8, 8



## 12 Bibliographie

1. HUTCHINS, Edwin. *Cognition in the Wild* [en ligne]. The MIT Press, 1995 [visité le 2025-10-08]. ISBN 978-0-262-27597-2. Disp. à l'adr. doi: 10.7551/mitpress/1881.001.0001.
2. NORMAN, Donald A. *The Design of Everyday Things*. Revised and expanded edition. New York, New York : Basic Books, 2013. ISBN 978-0-465-05065-9.
3. *Organisation et Numérisation Des Informations Relatives Aux Bâtiments et Ouvrages de Génie Civil, y Compris Modélisation Des Informations de La Construction - Gestion de l'information Par La Modélisation Des Informations de La Construction - Partie 1 : Concepts et Principes*. AFNOR, 2018. Version corrigée 1 de 2019-5-P. No. NF EN ISO 19650-1.
4. *Modélisation des informations de la construction (BIM) - Niveau du besoin d'information Partie 1 : concepts et principes*. AFNOR, 2024. N° NF EN ISO 7817-1.
5. GOLDRATT, Eliyahu M.; COX, Jeff. *The Goal : A Process of Ongoing Improvement*. 2nd rev. ed. Great Barrington, MA : North River Press, 1992. ISBN 978-0-88427-061-4.
6. WOMACK, James P.; JONES, Daniel T. *Lean Thinking : Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. 1st Free Press ed., rev. and updated. New York : Free Press, 2003. ISBN 978-0-7432-4927-0.
7. CAELEN, Jean (éd.). *Le consommateur au coeur de l'innovation*. Paris : CNRS, 2004. CNRS sociologie. ISBN 978-2-271-06280-2.
8. DEL SAVIO, Alexandre Almeida; VIDAL QUINCOT, José Francisco; BAZÁN MONTALTO, Alvaro Daniel; RISCHMOLLER DELGADO, Leonardo Antonio; FISCHER, Martin. Virtual Design and Construction (VDC) Framework: A Current Review, Update and Discussion. *Appl. Sci.* [en ligne]. 2022, vol. 12, no. 23, p. 12178 [visité le 2025-06-29]. ISSN 2076-3417. Disp. à l'adr. doi: 10.3390/app122312178.
9. MATHIAS PETTER GUSTAFSSON; GUSTAFSSON, Mathias Petter; PERNILLA GLUCH; GLUCH, Pernilla; SIGRID GUNNEMARK; GUNNEMARK, Sigrid; KATHARINA HEINKE; HEINKE, Katharina; DAN ENGSTRÖM; ENGSTRÖM, Dan. The Role of VDC Professionals in the Construction Industry. *Procedia, Econ. Finance* [en ligne]. 2015, vol. 21, no. 21, p. 478-485 [visité le 2025-01-22]. ISSN 22125671. Disp. à l'adr. doi: 10.1016/S2212-5671(15)00202-6.
10. MUGHEES ASLAM; ASLAM, Mughees; ZHILI GAO; GAO, Zhili; GARY SMITH; SMITH, Gary R. Integrated Implementation of Virtual Design and Construction (VDC) and Lean Project Delivery System (LPDS). *J. Build. Eng.* [en ligne]. 2021, vol. 39, p. 102252 [visité le 2025-01-22]. ISSN 23527102. Disp. à l'adr. doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102252.
11. MOHAMED YASSINE BEN JEMAA. *Implémentation de solutions intégrées pour la gestion de l'information dans les chantiers de construction* [en ligne]. 2017. [visité le 2025-06-25]. Disp. à l'adr. : [https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/1898/1/BEN\\_JEMAA\\_Mohamed\\_Yassine.pdf](https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/1898/1/BEN_JEMAA_Mohamed_Yassine.pdf). M.S. Thesis. UNIVERSITÉ DU QUÉBEC.

12. COTTET, Francis; GROLLEAU, Emmanuel. *Systèmes Temps Réel de Contrôle-Commande: Conception et Implémentation*. Paris: Dunod, 2005. ISBN 978-2-10-007893-6.
13. BLAISE SOLA; JÉRÉMIE BELLEC; ALAIN DESPIAU-PEYRALADE; ALAIN FRANCO; BRUNO SOUYRIS. *Le BIS & Le BOS, Les Outils de La Gouvernance Des Données Du Bâtiment*. 2022. Livre blanc, 01. Smart Building Alliance.
14. BENZERAFA-ALILAT, Manel; GIBERT, Patrick. De l'inflation normative à l'amplification des lois dans le processus parlementaire : pistes pour une analyse avancée des facteurs inflationnistes. *Rev. Fr. adm. Publique* [en ligne]. 2022, t. 182, n° 2, p. 541-563 [visité le 2025-06-29]. ISSN 0152-7401. Disp. à l'adr. DOI : 10 . 3917 / rfap . 182 . 0196.
15. ARTO KIVINIEMI; MARTIN FISCHER; VLADIMIR BAZJANAC; BOYD PAULSON. *PREMISS - Requirements Management Interface to Building Product Models: Problem Definition and Research Issues*. 2004-10. Working Paper, WP092. Stanford University. Aussi disponible à l'adresse: <https://purl.stanford.edu/ds532qd2802>.
16. SHAHRUDDIN, Syafizal; ZAIRUL, Mohd. BIM Requirements across a Construction Project Lifecycle: A PRISMA-Compliant Systematic Review and Meta-Analysis. *International Journal of Innovation*. 2020, vol. 12, no. 5.
17. ADRIENNE COSTA. La Construction, La Norme et l'architecte. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*. 2012, n° 67, p. 44-47. ISSN 1268-4783. Aussi disponible à l'adresse : <https://stm.cairn.info/revue-responsabilite-et-environnement1-2012-3-page-44?lang=fr>.
18. MABELO, Pascal Bohulu. Requirements Management and Project Lifecycle. *PM World Journal*. 2025, vol. XIV, no. II. ISSN 2330-4480.
19. DEVINAZ, Gilbert-Luc; JEAN-PIERRE MOGA; OLIVIER RIETMANN. *Rapport d'information fait au nom de la délégation aux entreprises relatif à la simplification des règles et normes applicables aux entreprises*. 2023-06-15. Rapport d'information, 743. Sénat. Aussi disponible à l'adresse : <https://www.senat.fr/>.
20. *Guide de légistique*. 3e édition. Paris : La Documentation française, 2017. ISBN 978-2-11-145578-8.
21. *Pratiques de Normalisation Recommandées Par l'ISO et l'IEC à Leurs Organismes Nationaux*. Suisse : ISO/IEC, 2019. Deuxième édition. N° ISO/IEC GUIDE 59. Aussi disponible à l'adresse : <https://isotc.iso.org/livelink/livelink/Open/8389141>.
22. BAUDET, Sébastien. « Trop de normes » : AFNOR démêle le vrai du faux [en ligne]. Groupe AFNOR, 2024-02-23. [visité le 2025-06-24]. Disp. à l'adr. : <https://www.afnor.org/actualites/trop-de-normes-afnor-demele-le-vrai-du-faux/>.
23. *Entry into Force of the European AI Regulation: The First Questions and Answers from the CNIL* [en ligne]. Cnil, 2024-07-12. [visité le 2025-06-25]. Disp. à l'adr.: <https://www.cnil.fr/en/entry-force-european-ai-regulation-first-questions-and-answers-cnil>.

24. ROBERTO RODRIGUEZ. *Cohérence ou contradiction ? Les effets des réglementations environnementales sur le secteur du bâtiment. Une analyse à deux niveaux*. [en ligne]. 2022-11. [visité le 2025-06-24]. Working Paper, 2. Sciences Po. Disp. à l'adr. : [https : / / www . sciencespo . fr / ecole - urbaine/](https://www.sciencespo.fr/ecole-urbaine/).
25. PIMO, Maeva Dolores. *Mise en place des solutions documentaires dans un projet de dématérialisation : le cas d'un système de Gestion Electronique des Documents ou d'un Système d'Archivage Electronique installé au sein des entreprises de Yaoundé*. 2021. Mém. de mast. Université Senghor.
26. BJÖRK, Bo-Christer. Electronic Document Management in Temporary Project Organisations: Construction Industry Experiences. *Online Information Review* [en ligne]. 2006, vol. 30, no. 6, p. 644-655 [visité le 2025-06-28]. ISSN 1468-4527. Disp. à l'adr. DOI: 10.1108/14684520610716144.
27. *Information Delivery Specification - buildingSMART International* [en ligne]. 2024-05-24. [visité le 2025-06-27]. Disp. à l'adr.: [https : / / www . buildingsmart . org / standards / bsi - standards / information - delivery - specification-ids/](https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/information-delivery-specification-ids/).
28. S. DINESH KUMAR; KUMAR, Srinath Shiv; JACK CHIN PANG CHENG; CHENG, Jack Chin Pang. A BIM-based Automated Site Layout Planning Framework for Congested Construction Sites. *Autom. Constr.* [en ligne]. 2015, vol. 59, p. 24-37 [visité le 2025-01-22]. ISSN 09265805. Disp. à l'adr. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.07.008.
29. TOM C. BORST; HERMAN G. MAYER; CHRISTIAN FREY; WOLFRAM KLEIN. BIM for Simulation. In: *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2015*. Amsterdam, 2015, p. 1-13.
30. GAL, Frédéric. Simulation énergétique dynamique (SED) – Maîtrise des consommations d'énergie. *La construction responsable* [en ligne]. 2025 [visité le 2025-06-28]. Disp. à l'adr. DOI : 10.51257/a-v2-c8103.
31. CHAILLOU, Stanislas. *L'intelligence artificielle au service de l'architecture*. Antony : Éditions le Moniteur, 2021. ISBN 978-2-281-14485-7.
32. MOREAU, Jean-François. *Conception électrique, quelles solutions et évolutions?* [en ligne]. Filière 3e, 2019-06-27. [visité le 2025-06-24]. Disp. à l'adr. : [https : / / www . filiere - 3e . fr / 2019 / 06 / 27 / conception - electrique - quelles - solutions - et - evolutions/](https://www.filiere-3e.fr/2019/06/27/conception-electrique-quelles-solutions-et-evolutions/).
33. Van de BRUG, Gijs. *Interdisciplinary Configuration Methods, An Element-Based Approach to Configure Design Changes within Multidisciplinary Projects*. 2025. Aussi disponible à l'adresse: [https : //resolver.tudelft.nl/uuid:d7dc669d - 5c0b - 44b2 - 8cd3 - f0f8ae0ecbf0](https://resolver.tudelft.nl/uuid:d7dc669d-5c0b-44b2-8cd3-f0f8ae0ecbf0). Thèse de doct. Delft University of Technology.
34. MATHEWS, Malachy; ROBLES, Dan; BOWE, Brian. BIM+Blockchain: A Solution to the Trust Problem in Collaboration? In: 2017. Disp. à l'adr. DOI: 10.21427/D73N5K.
35. ICAB. *Eurocodes, Codes de Construction En Europe* [en ligne]. [visité le 2025-06-26]. Disp. à l'adr. : [https : // eurocode . fr / fr /](https://eurocode.fr/fr/).

36. CHARPENTIER, D.; HYVERNAGE, O. *Référentiel pour la certification des professionnels de la foudre* [en ligne]. INERIS, [s. d.]. Version 4.0 [visité le 2025-06-26]. Disp. à l'adr. : <https://prestations.ineris.fr/>.
37. *Ergonomie de l'interaction Homme-Système - Partie 11 : Utilisabilité - Définitions et Concepts*. AFNOR, 2018. Version de 2018-05-P. No. NF EN ISO 9241-11.
38. *Décret N° 2020-887 Du 20 Juillet 2020 Relatif Au Système d'automatisation et de Contrôle Des Bâtiments Non Résidentiels et à La Régulation Automatique de La Chaleur*. 2020.
39. *Smart Readiness Indicator - European Commission* [en ligne]. [visité le 2025-06-27]. Disp. à l'adr.: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/smart-readiness-indicator\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/smart-readiness-indicator_en).
40. LOURAU, René. Analyse institutionnelle et question politique. *homso* [en ligne]. 1973, t. 29, n° 1, p. 21-34 [visité le 2025-07-03]. ISSN 0018-4306. Disp. à l'adr. doi : 10.3406/homso.1973.1831.
41. LINDBLAD, Hannes; VASS, Susanna. BIM Implementation and Organisational Change: A Case Study of a Large Swedish Public Client. *Procedia Econ. Finance* [en ligne]. 2015, vol. 21, p. 178-184 [visité le 2025-01-22]. ISSN 22125671. Disp. à l'adr. doi: 10.1016/S2212-5671(15)00165-3.
42. PAULA GORDO GREGORIO. *La continuité informationnelle dans les projets BIM, de la conception à la gestion du bâtiment : une analyse du système d'acteurs* [en ligne]. vendredi 26 mai 2023. [visité le 2025-06-24]. Disp. à l'adr. : [https://theses.hal.science/tel-04167158v1/file/CNAM\\_GORDOGREGORIO\\_2023.pdf](https://theses.hal.science/tel-04167158v1/file/CNAM_GORDOGREGORIO_2023.pdf). Thèse de doct. HESAM Université.
43. HARDIN, Brad; MCCOOL, David; FAILLA, Luigi; TATIN, Thibault; LÉVY, Rachel. *Le BIM appliqué au management du projet de construction : outils, méthodes et flux de travaux*. La Plaine-Saint-Denis Paris : Afnor éditions Éditions Eyrolles, 2019. ISBN 978-2-212-14469-7 978-2-12-465716-2.
44. GUILLOU, Maurice; RESPIN-MAZET, Florence; SALLE, Robert. La Segmentation Dans Les Entreprises Travaillant Par Affaires : L'exemple de Spie Batignolles Dans Le Secteur Du BTP : *Décisions Marketing* [en ligne]. 2003, t. N° 31, n° 3, p. 63-71 [visité le 2025-07-03]. ISSN 0779-7389. Disp. à l'adr. doi : 10.3917/dm.031.0063.
45. SHNEIDERMAN, Ben; PLAISANT, Catherine; COHEN, Maxine; JACOBS, Steven; ELMQVIST, Niklas. *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction*. Sixth edition. London: Pearson, 2016. Always Learning. ISBN 978-0-13-438038-4.
46. NOGIER, Jean-François. *UX design et ergonomie des interfaces, 7ème édition*. 7e éd. Paris : Dunod, 2020. ISBN 978-2-10-080696-6.
47. LONGO, Luca; WICKENS, Christopher D.; HANCOCK, Gabriella; HANCOCK, P. A. Human Mental Workload: A Survey and a Novel Inclusive Definition. *Front. Psychol.* [en ligne]. 2022, vol. 13, p. 883321 [visité le 2025-06-29]. ISSN 1664-1078. Disp. à l'adr. doi: 10.3389/fpsyg.2022.883321.
48. MORAY, Neville. *Mental Workload: Its Theory and Measurement* [en ligne]. 1st ed. Boston: Springer, 1979 [visité le 2025-06-29]. ISBN 978-1-4757-0886-8

- 978-1-4757-0884-4. Disp. à l'adr. doi: 10.1007/978-1-4757-0884-4.
49. VICENTE, Kim J.; RASMUSSEN, Jens. Ecological Interface Design: Theoretical Foundations. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.* [en ligne]. 1992, vol. 22, no. 4, p. 589-606 [visité le 2025-06-29]. issn 00189472. Disp.   l'adr. doi: 10.1109/21.156574.
  50. BURNS, Catherine M.; HAJDUKIEWICZ, John. *Ecological Interface Design*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004. isbn 978-0-367-39414-1.
  51. BORREMANS, Valentina. *Guide to Convivial Tools*. New York, N.Y: Library Journal, 1979. LJ Special Report, no. 13. isbn 978-0-8352-1269-4.
  52. CONTRAINTE : *Etymologie de CONTRAINTE* [en ligne]. [visité le 2025-09-29]. Disp.   l'adr. : <https://www.cnrtl.fr/etymologie/contrainte//2>.
  53. *Définition : Contrainte* [en ligne]. [visité le 2025-09-29]. Disp.   l'adr. : <https://www.toupie.org/Dictionnaire/Contrainte.htm>.
  54. FRANÇAISE, Académie. *contrainte* | *Dictionnaire de l'Académie française* | 9e édition [en ligne]. [visité le 2025-09-29]. Disp.   l'adr. : <http://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9C3882>.
  55. *Spécification géométrique des produits (GPS) - Association*. AFNOR, 2023. Version 1. N  NF EN ISO 4351.
  56. *Technologies de l'information - Vocabulaire* [en ligne]. ISO/IEC, 2015 [visité le 2025-10-06]. N  ISO/IEC 2382. Disp.   l'adr. : <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso-iec:2382:ed-1:v2:fr>.
  57. *Information géographique - Langage de schéma conceptuel*. AFNOR, 2024. Version 2. N  NF EN ISO 19103.
  58. *Gestion de La Sûreté de Fonctionnement - Partie 1 : Lignes Directrices Pour La Gestion et l'application*. AFNOR, 2014. No. NF EN 60300-1.
  59. QUESNEVILLE, Hadi; HOLOGNE, Odile; LIGHTBOURNE, Muriel; JANET, Cécile; GARDIN, Timothée; LACOMBE, Clémence; GRUSON-DANIEL, C lya; JEAN, Benjamin. Recommandations sur les usages du webscraping au sein d'INRAE [en ligne]. 2024, 19 p. [Visité le 2025-07-21]. Disp.   l'adr. doi : 10.17180/vka1-ng75.
  60. *Code de La Propriété Intellectuelle*. [N.d.].

## A Analyse des normes

### A.1 Introduction

### A.2 Périmètre de l'étude

L'étude se concentre sur les normes volontaires françaises (NF) référencées par AFNOR et publiées à la date de la collecte. Le périmètre inclut toutes les normes relevant du domaine "Construction et urbanisme" selon la classification AFNOR Norm'Info.

Les normes ISO/IEC sont souvent transposées en normes NF (NF EN ISO, etc.)

AFNOR est le point d'entrée national reconnu par l'État pour la normalisation volontaire.

Les normes d'application obligatoire sont issues de ce corpus (via réglementations).

Par l'analyse des textes et de leurs métadonnées, nous tenterons de répondre aux questions suivantes :

- Q1 : Quelle est l'ampleur documentaire du corpus normatif applicable à l'industrie de la construction, mesurée en nombre de documents et en volume paginé ?
- Q2 : La filière construction présente-t-elle une densité normative supérieure à celle d'autres secteurs industriels comparables, en termes de nombre de normes actives et de leur volumétrie documentaire ?
- Q3 : Comment les textes normatifs se répartissent-ils entre les sous-domaines techniques, professions et spécialités représentatives de la filière construction, selon les descripteurs et indices de classement ?

### A.3 Méthodologie

#### A.3.1 Cadre juridique

Il n'existe pas de base de données publiques recensant l'ensemble des textes de normes et leurs métadonnées. Il convient donc de constituer cette base de donnée en collectant les informations publiquement accessibles.

Cette opération implique l'emploi du web scraping.

Le web scraping consiste à extraire automatiquement (to scrape : gratter), de manière massive des données d'un site web. – INRAE<sup>59</sup>

La légalité d'une telle opération semble parfois faire débat. (ref à ajouter)

Certains acteurs, notamment l'AFNOR, s'oppose à la fouille automatisée des textes que l'organisme fournit ainsi qu'à l'emploi de modèles d'intelligence artificielle sur ceux-ci tels que l'exprime ce paragraphe apposés en première page de couverture :

AFNOR, en tant que titulaire des droits d'auteur ou distributeur autorisé, s'oppose expressément à toute intégration, transmission ou absorption totale ou partielle du présent document par des moteurs ou algorithmes d'Intelligence Artificielle (IA). AFNOR s'oppose également à toute fouille de textes et de données ou création dérivée produite par une IA et basée sur le présent document.

Cela dit, le Code de la propriété intellectuelle précise les modalités de copie et de reproduction des bases de données (Art. L342-3) et les droits de manipulation des textes dans un cadre de recherche scientifique (Art. L122-5 et L122-5-3)<sup>60</sup> en précisant spécifiquement que :

Des copies ou reproductions numériques d'œuvres auxquelles il a été accédé de manière **licite** peuvent être réalisées **sans autorisation des auteurs** en vue de **fouilles de textes et de données** menées à bien aux seules fins de la recherche scientifique par les organismes de recherche [...] ou pour leur compte et à leur demande par d'autres personnes, y compris dans le cadre d'un partenariat sans but lucratif avec des acteurs privés. – Article L122-5-3<sup>60</sup>

L'exploration des textes publiés par l'AFNOR et obtenus de manière licite est donc autorisée.

### **A.3.2 Données collectées**

Métadonnées accessibles publiquement via Norm'Info et Boutique AFNOR : Référence (ex : NF C15-100) Titre Date de publication Nombre de pages Codes International Classification for Standards (ICS) Indice de classement Domaine technique Commission de normalisation

### **A.3.3 Protocole technique**

Méthode de collecte : Web scraping (à documenter)

Limite : seules les normes publiées et publiquement référencées sur le site marchand de l'AFNOR disponibles à la vente ou référencées, sont incluses.

## **A.4 Méthodes d'analyse**

Analyse descriptive : Nombre total de documents / pages Évolution temporelle des publications (si date disponible)

Analyse comparative : Densité normative dans la construction vs autres domaines AFNOR (en comparant les volumes ICS sectoriels)

Analyse thématique / taxonomique : Catégorisation des normes par code ICS, indice de classement, domaine technique Projection possible par métier : architecture, génie civil, thermique, électricité...

Outils recommandés : Python (pandas + matplotlib)

## **A.5 Résultats obtenus**

Cartographie de la norme dans la construction

Poids normatif par spécialité

Identification d'une sur-normativité éventuelle

Premiers indicateurs pour évaluer la « charge de la norme »

## **A.6 Discussion et perspectives**

- B Analyse des ontologies**
- C Analyse des méthodes de test logiciels**
- D Analyse des langages de balisage légers**
- E Analyse des standards d'information**