

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

0	Introduction générale	7
0.1	Contexte et motivation	7
0.1.1	Sclérosité systémique des lotissements traditionnels	7
0.1.2	Emergence de nouveaux acteurs	7
0.1.3	Discorde entre ergonomie et fonctionnalités	7
0.1.4	Conclusion	7
0.2	Problématique de recherche	8
0.3	Objectifs et contributions	8
0.4	Organisation du document	8
1	Etat de l’art	9
1.1	Les contraintes dans la construction	9
1.1.1	Définition de contrainte	9
1.1.2	Taxonomie des contraintes	10
1.1.3	Médiums et volumétrie	11
1.1.4	Exercice des contraintes	11
1.1.5	Cadre de travail	13
1.2	Génie électrique et systèmes contraints	14
1.2.1	Spécificités du génie électrique	14
1.2.2	Contraintes en conception électrique	15
1.2.3	Optimisation multicritères	15
1.3	Vérification et validation en ingénierie	15
1.3.1	Concepts fondamentaux	15
1.3.2	Méthodes de traitement	15
1.3.3	Défis en génie électrique	15
1.4	Apports du génie logiciel	15
1.4.1	Programmation par contraintes	15
1.4.2	Programmation piloté par le comportement	15
1.4.3	Traitement automatique langage	15
1.4.4	Business rule engine	16
1.4.5	Visualisations et interactions	16
1.5	Analyse critique et positionnement	16
1.5.1	Lacunes identifiées	16
1.5.2	Opportunités de recherche	16
1.6	Conclusion	17
2	Problématique et méthodologie de recherche	18
2.1	Formulation de la problématique	18
2.1.1	Questions de recherche	18
2.1.2	Hypothèses de recherche	18
2.2	Approche méthodologique	18
2.2.1	Méthodologie de recherche	18
2.2.2	Stratégie de validation	18
2.2.3	Métriques d’évaluation	18

2.3	Outils et environnement de recherche	18
2.3.1	Outils de développement	18
2.3.2	Cas d'études	18
2.4	Conclusion	18
3	Approche de l'ingénierie par les contraintes	19
3.1	Fondements théoriques	19
3.1.1	Définition et concepts de base	19
3.1.2	Approches de résolution de contraintes	19
3.1.3	Applications en ingénierie	19
3.2	Architecture conceptuelle du framework	19
3.2.1	Vue d'ensemble	19
3.2.2	Principes directeurs	19
3.3	Extension des contraintes électriques	19
3.3.1	Syntaxe	19
3.3.2	Opérateurs de contraintes	19
3.3.3	Gestion de l'incertitude	19
3.4	Mécanismes de résolution de contraintes	19
3.4.1	Traitement multi-niveaux	19
3.4.2	Algorithmes adaptatifs	19
3.4.3	Intégration de métamodèles	19
3.5	Vérification formelle	19
3.5.1	Génération automatique de propriétés	19
3.5.2	Model checking adaptatif	19
3.5.3	Analyse de robustesse	19
3.6	Interface utilisateur et outils	19
3.6.1	Environnement de développement intégré	19
3.6.2	Intégration aux outils métiers	20
3.7	Conclusion	20
4	Implémentation	21
4.1	Architecture logicielle	21
4.1.1	Choix technologiques	21
4.1.2	Modules principaux	21
4.1.3	Tests unitaires et d'intégration	21
4.2	Conclusion	21
5	Validation expérimentale	22
5.1	Protocole d'essais	22
5.2	Cas d'étude 1 :	22
5.3	Cas d'étude 2 :	22
5.4	Cas d'étude 3 :	22
5.5	Analyse comparative	22
5.5.1	Métriques de performance	22
5.5.2	Limitations identifiées	22
5.6	Conclusion	22

6	Discussion et perspectives	23
6.1	Analyse des contributions	23
6.1.1	Contributions théoriques	23
6.1.2	Contributions méthodologiques	23
6.1.3	Contributions pratiques	23
6.2	Limites et défis	23
6.2.1	Limites théoriques	23
6.2.2	Limites pratiques	23
6.2.3	Défis organisationnels	23
6.3	Perspectives d'amélioration	23
6.3.1	Extensions théoriques	23
6.3.2	Améliorations techniques	24
6.3.3	Extensions domaines	24
6.4	Impact scientifique et industriel	24
6.4.1	Impact sur la recherche	24
6.4.2	Impact industriel	24
6.4.3	Impact sociétal	24
7	Conclusion générale	25
8	Références du document	26
8.1	Liste des figures	26
8.2	Liste des tableaux	26
8.3	Liste des codes sources	26
8.4	Liste des glosses	26
8.5	Liste des acronymes	26
9	Bibliographie	27
A	Analyse des normes	28
A.1	Introduction	28
A.2	Périmètre de l'étude	28
A.3	Méthodologie	28
A.3.1	Cadre juridique	28
A.3.2	Données collectées	29
A.3.3	Protocole technique	29
A.4	Méthodes d'analyse	29
A.5	Résultats obtenus	29
A.6	Discussion et perspectives	29
B	Analyse des ontologies	30
C	Analyse des méthodes de test logiciels	30
D	Analyse des langages de balisage légers	30

Annexes

0 Introduction générale

0.1 Contexte et motivation

0.1.1 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 ("tamponé, double tamponé..." 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

0.1.2 Emergence de nouveaux acteurs

(informatique et numérique, Les ESN dans la construction?) => Nouveaux outils et moyens de production => Besoins, impacts et opportunités

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.¹ 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.^{2,3}

0.1.3 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

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

Faire table rase!

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

Question principale :

Questions complémentaires :

Comment créer un environnement de gestion des contraintes hétéroclytes ?

Comment décrire une contrainte en langage naturel ?

0.3 Objectifs et contributions

0.4 Organisation du document

1 Etat de l'art

1.1 Les contraintes dans la construction

1.1.1 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.⁴ Dans le langage courant, une contrainte désigne tout ce qui force ou limite la liberté d'action.⁵ 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.⁵ En mécanique, le mot contrainte sert à traduire l'anglais stress, soit une force appliquée à un matériau qui tend à le déformer.⁶ 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. Voici quelques définitions normatives issues de standards ISO illustrant la variété d'usages du mot :

- restriction de paramètres ou de degré de liberté (orientation, taille, position, proximité), ^{ISO_4351}
- restriction attachée à un type de données, ^{ISO/CEI_2382}
- condition formelle "exprimée en langage naturel ou dans un langage formel" qui précise ou limite la sémantique d'un modèle. ^{ISO_19103:2024}
- borne de l'espace de recherche de solutions ^{ISO/CEI_2382-28} 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 les contraintes tel que :

Expression d'une condition, limitation ou obligation, formulée en langage naturel ou formel, qui restreint l'espace des solutions possibles afin de garantir que la solution retenue soit conforme au contexte (environnement légal, social, économique, écologique 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.

1.1.2 Taxonomie des contraintes

Illustrer chaque catégorie de contrainte par des exemples précis

expliciter le périmètre de contrainte de la thèse

Nature technique :

- Géométriques : espacements, tolérances... Comment les décrire ? eg. mode de pose des câbles, espacement d'une prise d'un point d'eau... Quel parallèle entre contrainte géométrique et la langue naturelle + éventuellement jargon métier
- Physiques : Énergie, signal, interférences, échauffements, sections, charges, vibrations, environnement (corrosion) : Électrique, Fluidique...
- Chimiques : Couple galvanique

Nature fonctionnelle :

- Environnementales : Net 0, Emprunte carbone, biodiversité... ici se référer aux objectifs de transition écologique uniformisée par l'UE, explorer les critères "DNSH"
- Sécuritaires : Cybersécurité, sécurité physique des personnes, Stockage produits dangereux, protection individuelle
- Logiques : Behavior-Driven Design, Domain-Driven Design, Test-Driven Development...

Il peut aussi exister des contraintes liées au coût, à la disponibilité des composants ou des ressources de l'entité, ou des calendriers fixes susceptibles de nécessiter un compromis entre la fonctionnalité et la sûreté de fonctionnement. – NF EN 60300-1:2014⁷

Nature organisationnelle :

- Protocolaires : Procédures de validation, processus de gestion de projet
- Politique : Urbanisme...
- Sociétales : Habilitations, formations...
- Financières : Limite budgétaire
- Sociales :

- Légales : Propriété intellectuelle,
 - Temporelles : Hiérarchisation et dépendance des actions
 - Contractuelles :
- Justifier le besoin d'une "méthode de rédaction générique".

1.1.3 Médiuns 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 1 : 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

1.1.4 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 60300-1:2014⁷

La relation entre exigences et contraintes est représentée par la 2. 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.

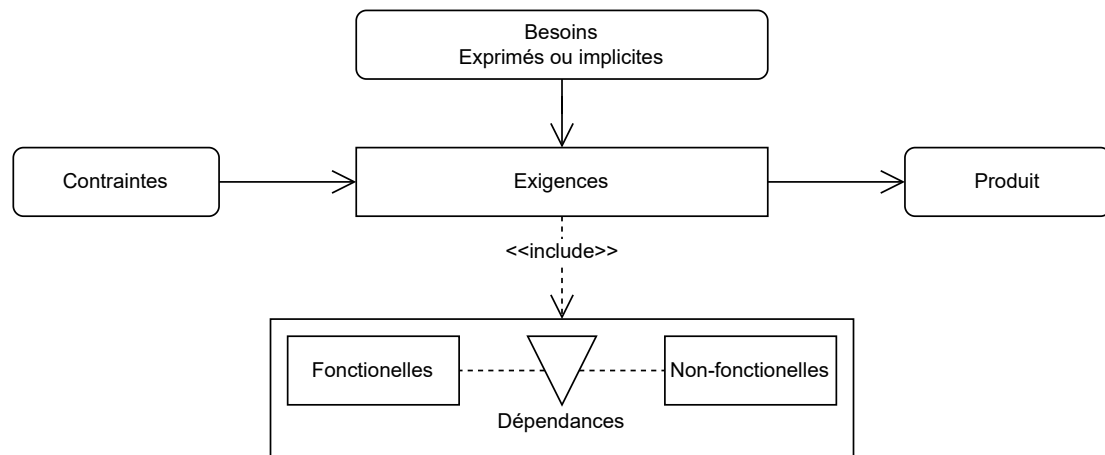


FIGURE 2 : La relation entre contraintes et exigences selon l'ISO 60300-1⁷

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 3.

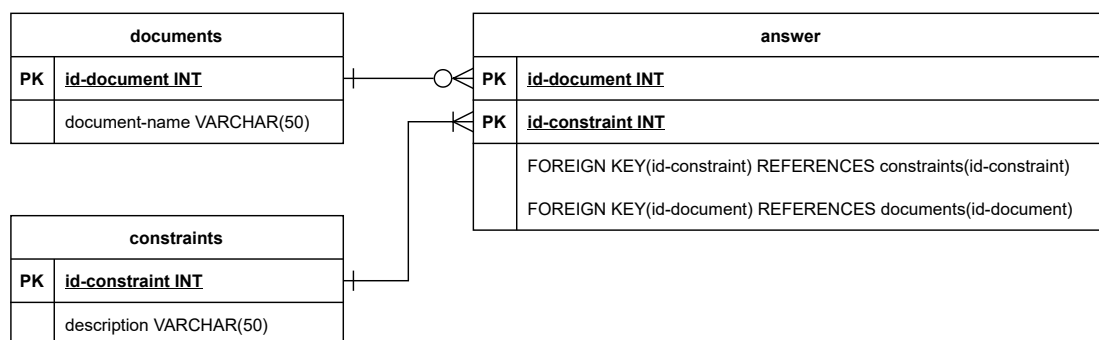


FIGURE 3 : MLD - Association des exigences aux livrables

Pour la suite de l'étude, le mot "contrainte" regroupera l'ensemble des éléments impactant la poursuite d'un projet. Il regroupera donc également la notion d'exigence et la notion de besoin. Démontrer l'hétérogénéité et le chaos actuels, et conclure sur l'inefficacité des approches qui tentent de "traduire" ce chaos au lieu de le "discipliner" à la source. La question "vers un DSL de la construction?" (1.5.2) est la conclusion naturelle de cette analyse.

1.1.5 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. Cela permet d'assurer la définition unifiée de "contrainte" proposée au paragraphe 1.1.1.

1.2 Génie électrique et systèmes contraints

1.2.1 Spécificités du génie électrique

Expression sous forme de diagramme SIPOC de la chaîne de valeur en électrotechnique ?

1.2.2 Contraintes en conception électrique

1.2.3 Optimisation multicritères

1.3 Vérification et validation en ingénierie

1.3.1 Concepts fondamentaux

Vérification : "Construisons-nous le produit correctement?" - Conformité aux spécifications

Validation : "Construisons-nous le bon produit?" - Adéquation aux besoins utilisateur

1.3.2 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

1.3.3 Défis en génie électrique

1.4 Apports du génie logiciel

1.4.1 Programmation par contraintes

Langage formels déclaratif textuel : Prolog, Claire, Raku, OCL, COBOL

? : OCL

Paradigme de programmation par les contraintes : Prolog, Claire, Raku

Paradigme de programmation en langage proche du naturel : COBOL, (SQL)

Solveurs de contraintes : CSL, SAT, etc.

1.4.2 Programmation piloté par le comportement

Fondements du (BDD) :

- Une évolution du (TDD) avec des inspirations du (DDD).

Syntaxe

1.4.3 Traitement automatique langage

Natural Language Processing, en français Traitement automatique du langage naturel. Large Language Model, Small Language Model...


```
Fonctionnalité: Connexion utilisateur
Exemple: Connexion avec email inconnu
  Etant donné que l'utilisateur est sur la page de connexion
  Lorsqu' il saisit un email
  Mais que cet email n'est pas connu par le SSO
  Alors il ne peut pas renseigner son mot de passe
Exemple: Connexion avec un mot de passe non valide
  Etant donné que l'utilisateur est sur la page de connexion
  Lorsqu' il saisit un email valide
  Et qu'il saisit un mot de passe non valide
  Alors il ne peut pas se connecter
```

Listing 1 : *Exemple de scénario Gherkin*

1.4.4 Business rule engine

Langages formels déclaratif visuels :

- (BPM) et (BPMN)
- Activity diagrams
- Programmation visuelle (No-Code, Workflows...)
- UML, (SysML), UAFML...

1.4.5 Visualisations et interactions

1.5 Analyse critique et positionnement

1.5.1 Lacunes identifiées

Très hétéroclite, besoin d'abstraction pour généraliser les approches.

La définition de l'environnement d'étude en particulier duquel le périmètre de texte institutionnel applicable n'est pas aisé à réaliser. Il manque en ce sens un mécanisme de sélection de l'environnement permettant de soucier automatiquement les contraintes appropriées.

Exemple 1 : Travaux dans une base opérationnelle

- imposition du respect de l'Arrêté Qualité de 1984 (AQ84)
- import des contraintes de l'AQ84 dans la base des contraintes du projet.

Exemple 2 : Travaux de distribution d'énergie électrique

- imposition du respect de la norme obligatoire NF C15-100
- import des contraintes de la NF C15-100 dans la base des contraintes du projet.

Exemple 3 : Travaux d'installation d'équipement dans une zone sismique 3

- imposition d'une résistance sismique particulière des équipements
- import des contraintes de l'EUROCODE 3 dans la base des contraintes du projet.

1.5.2 Opportunités de recherche

Recherches potentiellement associées : gestion du contexte, quality information framework vers un DSL de la construction ?

1.6 Conclusion

2 Problématique et méthodologie de recherche

2.1 Formulation de la problématique

2.1.1 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 ?

2.1.2 Hypothèses de recherche

1. "Une approche d'ingénierie basée sur une grammaire formelle et naturelle des contraintes, intégrée dans un environnement de vérification automatisé, permet de réduire significativement les non-conformités et la charge cognitive des acteurs par rapport aux processus traditionnels basés sur des matrices de traçabilité manuelles."

2.2 Approche méthodologique

2.2.1 Méthodologie de recherche

2.2.2 Stratégie de validation

2.2.3 Métriques d'évaluation

2.3 Outils et environnement de recherche

2.3.1 Outils de développement

2.3.2 Cas d'études

2.4 Conclusion

3 Approche de l'ingénierie par les contraintes

3.1 Fondements théoriques

3.1.1 Définition et concepts de base

3.1.2 Approches de résolution de contraintes

3.1.3 Applications en ingénierie

3.2 Architecture conceptuelle du framework

3.2.1 Vue d'ensemble

3.2.2 Principes directeurs

Décrire la "méthode de rédaction générique des contraintes".

3.3 Extension des contraintes électriques

3.3.1 Syntaxe

3.3.2 Opérateurs de contraintes

3.3.3 Gestion de l'incertitude

Idée de Ledger pour tracer le contexte et l'évolution des décisions

3.4 Mécanismes de résolution de contraintes

3.4.1 Traitement multi-niveaux

3.4.2 Algorithmes adaptatifs

3.4.3 Intégration de métamodèles

3.5 Vérification formelle

Décrire l'architecture du "parser" et les mécanismes de model checking.

3.5.1 Génération automatique de propriétés

3.5.2 Model checking adaptatif

3.5.3 Analyse de robustesse

3.6 Interface utilisateur et outils

3.6.1 Environnement de développement intégré

Vérification à la volée, soulignement des erreurs, explications contextuelles, intégration de la vérification directement dans le flux de travail de l'utilisateur, plutôt que comme une étape de

validation finale.

3.6.2 Intégration aux outils métiers

3.7 Conclusion

4 Implémentation

4.1 Architecture logicielle

4.1.1 Choix technologiques

4.1.2 Modules principaux

4.1.3 Tests unitaires et d'intégration

4.2 Conclusion

5 Validation expérimentale

5.1 Protocole d'essais

5.2 Cas d'étude 1 :

5.3 Cas d'étude 2 :

5.4 Cas d'étude 3 :

5.5 Analyse comparative

5.5.1 Métriques de performance

Comment mesurer l'efficacité? Temps gagné? Nombre d'erreurs détectées en amont? Envisager des questionnaires pour évaluer la charge mentale (ex : NASA-TLX) avant et après l'utilisation de votre outil.

5.5.2 Limitations identifiées

5.6 Conclusion

6 Discussion et perspectives

6.1 Analyse des contributions

6.1.1 Contributions théoriques

6.1.2 Contributions méthodologiques

6.1.3 Contributions pratiques

6.2 Limites et défis

6.2.1 Limites théoriques

6.2.2 Limites pratiques

6.2.3 Défis organisationnels

6.3 Perspectives d'amélioration

6.3.1 Extensions théoriques

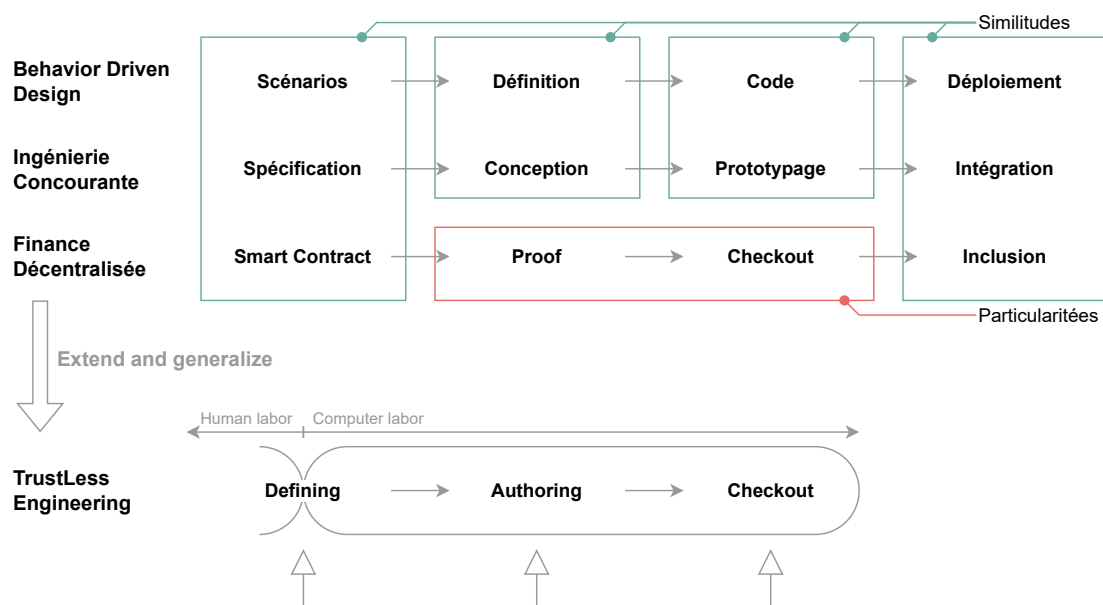


FIGURE 4 : Vers une ingénierie sans confiance ?

6.3.2 Améliorations techniques

6.3.3 Extensions domaines

6.4 Impact scientifique et industriel

6.4.1 Impact sur la recherche

6.4.2 Impact industriel

6.4.3 Impact sociétal

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

7 Conclusion générale

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 (?)

8 Références du document

8.1 Liste des figures

1	Proposition de représentation des environnements de contraintes	11
2	La relation entre contraintes et exigences selon l'ISO 60300-1 ⁷	12
3	MLD - Association des exigences aux livrables	13
4	Vers une ingénierie sans confiance?	23

8.2 Liste des tableaux

8.3 Liste des codes sources

1	Exemple de scénario Gherkin	16
---	---------------------------------------	----

8.4 Liste des glosses

Jalon Etape de validation partielle d'un projet. 12

8.5 Liste des acronymes

BPMN	16
BPM	16
BIM	7
BDD	15
DDD	15
ICS	29, 29, 29
SysML	16
SQL	15
TDD	15
UML	13, 16

9 Bibliographie

1. 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.
2. 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.
3. 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. Thèse de doct. HESAM Université.
4. *CONTRAINTE : Etymologie de CONTRAINT* [en ligne]. [visité le 2025-09-29]. Disp. à l'adr. : <https://www.cnrtl.fr/etymologie/contrainte//2>.
5. *Définition : Contrainte* [en ligne]. [visité le 2025-09-29]. Disp. à l'adr. : <https://www.toupie.org/Dictionnaire/Contrainte.htm>.
6. FRANÇAISE, Académie. *contrainte* | *Dictionnaire de l'Académie française* | 9e édition [en ligne]. [visité le 2025-09-29]. Disp. à l'adr. : <http://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9C3882>.
7. *Gestion de La Sûreté de Fonctionnement - Partie 1 : Lignes Directrices Pour La Gestion et l'application*. AFNOR, 2014. No. NF EN 60300-1.
8. QUESNEVILLE, Hadi; HOLOGNE, Odile; LIGHTBOURNE, Muriel; JANET, Cécile; GARDIN, Timothée; LACOMBE, Clémence; GRUSON-DANIEL, Célya; JEAN, Benjamin. *Recommandations sur les usages du webscraping au sein d'INRAE* [en ligne]. 2024, 19 p. [Visité le 2025-07-21]. Disp. à l'adr. doi : 10.17180/vka1-ng75.
9. *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. – INRAE⁸

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)⁹ 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 L122-5-3⁹

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 (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

Echanger avec A.Vial du CSTB pour une collaboration Application des ontologies en gestion des contraintes Panorama et comportement

C Analyse des méthodes de test logiciels

D Analyse des langages de balisage légers

E Analyse des standards d'information