



HAL
open science

Vision prospective d'une approche de détection des éléments non conformes dans les ERP selon la réglementation en vigueur

Selsebil Benelhaj Saghaier, Ana Roxin, Eric Leclercq

► To cite this version:

Selsebil Benelhaj Saghaier, Ana Roxin, Eric Leclercq. Vision prospective d'une approche de détection des éléments non conformes dans les ERP selon la réglementation en vigueur. eduBIM 2023 - 9e édition des Journées de l'enseignement et de la recherche autour du BIM et de la maquette numérique, Université de Bourgogne, Nov 2023, Dijon, France. hal-04353177

HAL Id: hal-04353177

<https://hal.science/hal-04353177v1>

Submitted on 19 Dec 2023

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

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

Copyright

Vision prospective d'une approche de détection des éléments non conformes dans les ERP selon la réglementation en vigueur

Selsebil Benelhaj Saghaier¹, Ana Roxin¹, Eric Leclercq¹

¹Laboratoire d'Informatique de Bourgogne (LIB), Université de Bourgogne,

selsebil_ben-el-haj-sghaier@etu.u-bourgogne.fr

{ana-maria.roxin, eric.leclercq}@u-bourgogne.fr

Résumé : Dans le but d'améliorer le processus d'évaluation de la conformité des bâtiments en termes d'accessibilité pour les Personnes à Mobilité Réduite (PMR), nous proposons une approche prospective pour la détection des éléments non conformes dans les bâtiments reposant sur la réglementation française d'accessibilité. Cet article expose nos études sur les réglementations d'accessibilité, les types de handicap et la représentation numérique des bâtiments.

Mots-clés : BIM, accessibilité des bâtiments, PMR, textes réglementaires, détection des éléments non conformes.

Abstract: To improve the process of building compliance-checking in terms of accessibility for Persons with Reduced Mobility (PRM), we propose a prospective approach for detecting non-compliant elements in buildings based on French accessibility legal regulations. The paper at hand presents our studies on accessibility regulations, types of disabilities and the digital representation of buildings.

Keywords: BIM, building accessibility, PLM, regulatory texts, detection of non-compliant elements.

1 Introduction

Depuis 2017, le handicap est une préoccupation importante en France, avec environ 12 millions de personnes concernées (INSEE, 2020). À ce titre, le gouvernement français a lancé le plan national Handicap 2017 – 2022 (CNH, 2020) avec notamment les actions "Développer des solutions de logement innovantes et inclusives" et "Engager la société vers une accessibilité universelle". Au niveau de la Région Bourgogne Franche Comté (BFC), la Feuille de Route Handicap BFC (Feuille de route Handicap BFC, 2019) vise à rendre accessibles l'ensemble des bâtiments de la Région ainsi que les établissements d'enseignement à l'horizon 2024. Le projet régional EASING (mobility of pErsons And acceSsible housING) souhaite répondre à cette problématique, notamment en spécifiant une approche permettant d'adapter les textes législatifs afin de pouvoir faciliter la détection de non-conformités dans des maquettes numériques de bâtiments. Ce projet interdisciplinaire réunit trois laboratoires de recherche : ELLIADD (Edition, Littératures, Langages, Informatique, Arts, Didactiques, Discours pour la conception des services et de l'expérience utilisateur, FEMTO-ST (Franche-Comté Electronique Mécanique Thermique et Optique – Sciences et Technologies) pour la modélisation du réseau de capteurs afin d'augmenter les capacités du logement et le LIB (Laboratoire Informatique de Bourgogne) pour la caractérisation de l'accessibilité des logements selon des contraintes réglementaires. Nos travaux au sein du LIB consistent à spécifier une approche permettant une gestion intégrée, cohérente et complète des données et connaissances d'un bâtiment et/ou d'un logement par rapport à la réglementation existante en termes d'accessibilité pour les Personnes à Mobilité Réduite (PMR).

Cet article décrit les travaux déjà réalisés, notamment les études sur les réglementations d'accessibilité, les types de handicap et la représentation numérique des bâtiments. Sur la base

de ces études, nous présentons une vision prospective de notre approche. L'article est structuré comme suit : la section 2.1 présente une étude des PMR et des différents types de handicaps, la section 2.2 contient une analyse des textes législatifs définissant les conditions d'accessibilité des bâtiments et enfin la section 2.3 résume notre étude des normes ouvertes existantes pour les maquettes numériques des bâtiments. La section 3 présente nos conclusions tirées de ces études en précisant le périmètre de notre approche dans le domaine d'application. Ensuite, nous présentons dans la section 4 une étude de l'état de l'art des approches similaires à la nôtre en identifiant leurs limites. La section 5 décrit les grandes lignes de notre approche envisagée ainsi que les travaux futurs et enfin la Section 6 conclue l'article.

2 Etudes préliminaires

Dans cette section, nous explorerons trois domaines clés : les PMR et les types de handicaps, les réglementations qui régissent les exigences d'accessibilité et les normes ouvertes pour la représentation numérique des bâtiments.

2.1 Etude des PMR et des types de handicaps

Nous rappelons que notre approche de détection des éléments non conformes d'un bâtiment se base sur la réglementation d'accessibilité pour les PMR. Selon la directive 2001/85/CE du Parlement européen et du Conseil européen, les PMR sont "toutes les personnes ayant des difficultés pour utiliser les transports publics, telles que, par exemple, personnes handicapées, personnes de petite taille, personnes transportant des bagages lourds, personnes âgées, femmes enceintes..." (Directive 2001/85/CE, 2001). Selon l'enquête "Mobilité des personnes" 2018-2019, deux tiers des PMR sont des personnes handicapées. La Classification Internationale du Fonctionnement, du Handicap et de la Santé (CIF) de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), a défini une personne handicapée comme "toute personne dont l'intégrité physique ou mentale est passagèrement ou définitivement diminuée, soit congénitalement, soit sous l'effet de l'âge ou d'un accident, en sorte que son autonomie, son aptitude à fréquenter l'école ou à occuper un emploi s'en trouvent compromises" (OMS 2001). On désigne par l'autonomie, "la capacité à se gouverner soi-même, sans être soumis à des contraintes extérieures" (Le Coadic, 2006).

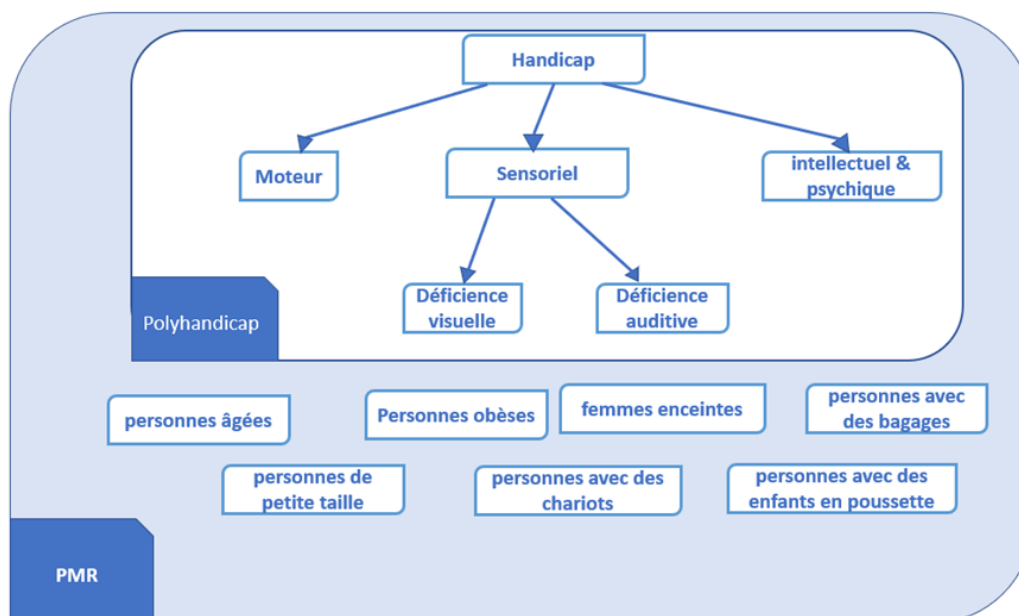


FIGURE 1 – Schéma de synthèse d'une PMR.

Les handicaps peuvent être classés en trois catégories : moteur, sensoriel, mental et psychique (OMS, 2001). Les handicaps moteurs entraînent des limitations permanentes ou temporaires des mouvements physiques et peuvent nécessiter des aides telles que des fauteuils roulants ou des cannes. Les handicaps sensoriels comprennent les déficiences visuelles, qui

peuvent aller de la difficulté à reconnaître les objets à la sensibilité à la lumière et les déficiences auditives, qui peuvent impliquer une perte partielle ou totale de l'audition. Les déficiences intellectuelles et psychologiques comprennent les déficiences mentales, caractérisées par des facultés cognitives, linguistiques et sociales insuffisantes, et les handicaps psychiques résultant de maladies mentales chroniques telles que la schizophrénie ou les psychoses maniaco-dépressives (Référentiel accessibilité, 2014). La figure 1 représente un schéma synthétique d'une PMR et ses profils.

2.2 Etude de la réglementation définissant les conditions d'accessibilité

Les réglementations sont "un ensemble de documents juridiques dont le but est de garantir que les politiques prévues par la législation sont respectées" (Yurchyshyna, 2009).

Lorsque l'on limite cette définition strictement au domaine de la construction, on peut définir les réglementations comme "des règles qui précisent le niveau minimum d'accessibilité, de performance énergétique et de sécurité pour les projets de construction, tel que les bâtiments" (Satti & Krawczyk 2004).

En France, les réglementations liées au secteur de la construction sont écrites dans le Code de la Construction et de l'Habitation (CCH) qui est un ensemble des articles législatifs et réglementaires régissant les dispositions relatives à la construction, à l'habitation et à l'urbanisme. Le CCH est consultable en ligne sur le site officiel de Légifrance. Il est également mis à jour selon les évolutions de la législation et aux enjeux du secteur de la construction et de l'habitat (CCH, 2023).

Les réglementations de l'accessibilité des PMR aux bâtiments ont été initialement stipulées dans la Loi n° 2005-102 du 11 février 2005 en ajoutant l'article R 111-18-2 dans le CCH. Selon cet article, "un bâtiment est considéré accessible s'il permet à une personne handicapée, avec la plus grande autonomie possible, de circuler, d'accéder aux locaux et équipements, d'utiliser les équipements, de se repérer et de communiquer. Les conditions d'accès des personnes handicapées doivent être les mêmes que celles d'une personne valide" (R 111-18-2, 2019).

En outre, selon les articles R111-1 à R111-27 et R122-1 à R122-28 du CCH, les bâtiments sont classés d'une part, selon leur usage, tels que les Maisons Individuelles (MI), les Bâtiments d'Habitation Collectifs (BHC) et les Établissements Recevant du Public (ERP) et d'autre part, selon leurs états de la construction, nous distinguons les bâtiments neufs, existants ou temporaires. Afin d'appliquer les dispositions de l'article R 111-18-2 du CCH qui définit la notion de "bâtiment accessible", l'arrêté du 17 mai 2006 a été promulgué pour déclarer les caractéristiques dimensionnelles d'un ERP accessible. Par la suite, cet arrêté a été abrogé par l'arrêté du 1er août 2006, lui-même abrogé par l'arrêté du 20 avril 2017, actuellement en vigueur. Cette dernière version impose des exigences sur les cheminements extérieurs, l'accès aux bâtiments, l'accueil du public, les circulations intérieures horizontales et verticales des parties communes du bâtiment (escalier et ascenseur), les chambres et les sanitaires accessibles, les équipements et dispositifs de commande ainsi que les sorties.

En se basant sur l'arrêté du 20 avril 2017¹, des documents techno-règlementaires ont été établis expliquant les exigences techniques d'un ERP accessible conformément à la loi en termes d'architecture et d'équipements ; ces documents peuvent être proposés sous la forme de notices d'accessibilité², de référentiel³ ou encore de guide⁴ contenant des fiches de prescriptions règlementaires. Afin de mettre en place ces réglementations techniques, plusieurs normes de bonnes pratiques ont été exigées pour diagnostiquer l'accessibilité des bâtiments aux PMR. Par exemple, la norme française BP P96-100⁵ constitue une référence de bonnes pratiques pour réaliser un diagnostic des ERP existants en termes d'accessibilité aux personnes handicapées. La norme vise à assister les maîtres d'ouvrage dans l'optimisation du processus de diagnostic en abordant divers aspects tels que la définition d'une stratégie d'accessibilité prenant en considération les aspects financiers, organisationnels et humains. Elle énonce

¹<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000034485459/>

²<https://www.tarn-et-garonne.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Amenagement-du-territoire-construction-logement-et-habitat/Accessibilite/Modele-de-notice-d-accessibilite-a-joindre-a-une-autorisation-de-travaux>

³ <https://cdn.paris.fr/paris/2019/07/24/c694dcccfd6cb8875c5f18ad7860db08b.pdf>

⁴ https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2019%2007%20guide_DHUP_erp-existants.pdf

⁵<https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/bp-p96100/accessibilite-aux-personnes-handicapees-guide-de-bonnes-pratiques-a-lattent/fal66769/34912#AreasStoreProductsSummaryView>

également les critères concernant les diagnostiqueurs, le déroulement du diagnostic et ses résultats.

2.3 Etude des normes ouvertes pour la représentation numérique des bâtiments

Selon l'*International Organization for Standardization* (ISO), le « Building Information Modeling » (ou BIM) se traduit en français par « modélisation des informations de la construction ». Le BIM est défini par l'ISO en tant qu'une « représentation numérique partagée d'un objet construit (comprenant bâtiments, ponts, routes, usines, etc.) pour faciliter les processus de conception, de construction et d'exploitation et former une base fiable permettant les prises de décision » (ISO 29481-1:2016). Le BIM est également une méthodologie de mise à jour d'un modèle de données d'un bâtiment ou d'une infrastructure à chaque étape de son cycle de vie, de la conception à la démolition, afin que ce modèle puisse être utilisé efficacement par les humains et les machines. Cette nouvelle approche de l'échange d'informations remplace les documents papier traditionnels c'est-à-dire les ns (PlanBIM, 2023). D'un point de vue normatif, *buildingSMART International* (bSI) est l'organisation internationale qui développe les normes ouvertes autour du BIM, qui sont ensuite consolidées et publiées par l'ISO en tant que normes internationales. L'*openBIM* est une approche consistant en l'utilisation dans la BIM de normes ouvertes uniquement. L'une des principales normes ouvertes d'*openBIM* est l'*Industry Foundation Classes* (IFC), spécifié sous la norme ISO 16739:2018. L'IFC est le « schéma conceptuel de données et format d'échange de fichiers pour les données de modélisation des informations de la construction » (ISO 16739:2018). L'IFC permet l'échange d'informations numériques entre différentes applications logicielles utilisées pour la conception, la construction et la gestion des bâtiments. Dans le modèle de données IFC, tout est traité comme un objet, comme par exemple, les éléments de construction, leurs propriétés (c'est-à-dire la hauteur, le matériau ou la couleur), les relations entre ces éléments de construction (e.g. une porte fait partie d'un mur), ou même la hiérarchie des éléments de construction eux-mêmes (e.g. un étage est au-dessus d'un autre étage). L'IFC a évolué au fil du temps avec différentes méthodes de sérialisation pour améliorer la flexibilité de l'échange des données. Les sérialisations IFC sont publiées sur le site technique de bSI⁶. La sérialisation normative de l'IFC est la sérialisation STEP (Standard for the Exchange of Product model data) basée sur l'AP 225 de l'ISO 10303:1994. Parmi les autres sérialisations existantes, nous pouvons citer ML (eXtensible Markup Language) ou encore le format zip, qui peut être utilisé pour compresser et regrouper plusieurs fichiers IFC. Afin d'exploiter les avantages du Web Sémantique qui est «est une extension du Web permettant aux machines de comprendre le sens des informations présentes sur le web» (Berners-Lee, 1998), l'IFC a été traduit en une ontologie IfcOWL (Beetz, et al., 2009). Cette ontologie a été conçue en effectuant des mappages de syntaxe directe entre les langages EXPRESS et OWL. D'un point de vue normatif, l'implémentations la plus solides d'une ontologie qui traduit l'IFC est IfcOWL proposée par (Pauwels & Terkaj, 2016). Selon le rapport technique bSI de 2017⁷, l'actuelle version d'IfcOWL (Pauwels & Terkaj, 2016) modifie certains choix faits dans la transformation présentée par Beetz et al en 2009, notamment concernant la modélisation des éléments de type liste.

En plus de l'IFC, les autres normes openBIM sont les normes *Information Delivery Manual* (IDM) et *Model View Definition* (MVD) spécifiées par bSI et publiées en tant que normes internationales ISO, respectivement sous l'ISO 29481-1:2010 et ISO 29481-3:2022. Selon l'ISO, l'IDM est «une documentation qui décrit le processus métier et donne des spécifications détaillées sur les informations nécessaires qu'un utilisateur exerçant un rôle particulier doit fournir à une étape particulière d'un projet» (ISO). Un IDM spécifie en langage naturel comment les données peuvent être échangées entre les différents acteurs durant le cycle de vie d'un bâtiment. Lorsque deux ou plusieurs acteurs échangent des informations, le processus sous-jacent doit respecter les contraintes et les exigences définies dans l'IDM correspondant. Les spécifications contenues dans un IDM sont ensuite mises en correspondance avec les concepts de l'IFC. Cette correspondance est définie sous la forme d'un MVD. En se basant sur

⁶ <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-schema-specifications/>

⁷ https://standards.buildingsmart.org/documents/20170830_LDWG_ifcOWLontology.pdf

un document IDM donné, un MVD représente “une exigence d’échange, spécifiquement associée à un ou plusieurs schémas d’informations normalisés particuliers” (ISO-OBP, 2023). En d’autres termes, un MVD correspond au sous-ensemble d’éléments IFC nécessaires et suffisants supportant les exigences définies dans l’IDM.

2.4 Etude des approches pour la vérification de réglementations

Le processus de la détection des éléments non-conformes dans les bâtiments s'accompagne d'un certain nombre de défis. La vérification des réglementations est l'un des défis les plus critiques qui comporte le processus de formalisation des règles ou autrement “*Rule Capture*” (Zhang et al., 2023) permettant de construire des règles de vérification à partir des documents réglementaires et les représenter de manière à être comprises et traitées par des systèmes automatisés. Afin d’être synthétiques, nous résumons ci-dessous les initiatives portées dans ce domaine en lien avec des activités de normalisation aux niveaux international et national.

Au niveau international au sein de bSI, le groupe de travail “*Rule Interoperability*” a publié, en 2015, un rapport intitulé “*Regulatory room working group report on open standards for Regulatory, Requirements and Recommendatory content*”. Afin de déléguer une représentation commune des exigences présentes dans les réglementations, les spécifications et les recommandations, *Regulatory, Requirements and Recommendatory* (RRR) en anglais, le rapport⁸ a examiné un ensemble d’outils et de langages de représentation des exigences comme étant des candidats permettant de rendre le contrôle des RRR interopérable, évolutif et fiable, tel que RASE pour “Requirements, Applicability, Selection and Exception”(Ventura et al., 2016) qui est une méthode de balisage permettant de mettre en évidence la logique implicite contenue dans les documents réglementaires, Jena Rule Language, SWRL(*Semantic Web Rule Language*), SPARQL (*SPARQL Protocol and RDF Query Language*) qui est un “langage de requête et un protocole standardisé utilisé pour interroger et manipuler des données stockées au format RDF(Resource Description Framework)”⁹, LegalDocML est un langage de balisage permettant de représenter des règles juridiques complexes en utilisant des éléments XML. Il est utilisé pour la représentation de divers types de règles juridiques, tels que les lois, les contrats, les accords, etc, l’*Ifc constraint model* qui se compose d’un ensemble de contraintes pouvant être utilisées pour valider différents aspects d’un modèle IFC, tels que sa structure, son exactitude et sa conformité aux normes et meilleures pratiques de l’industrie. Ces contraintes sont exprimées dans un format lisible par machine en utilisant la syntaxe EXPRESS ainsi que Java DROOLS est un moteur de règles écrit en Java. Il permet à l’utilisateur de définir des règles métier sous forme de <When> <Then> dont l’élément <When> de la règle est une expression booléenne, où l’élément <Then> est une commande à exécuter si l’élément <When> est vrai. En examinant ces candidats, il est apparu qu’ils n’avaient pas tous la même fonction, mais qu’ils pouvaient être organisés en couches et quatre couches ont été identifiées : une **couche source** pour les documents RRR, une **couche de balisage** qui annote les documents originaux avec des références et des rôles grammaticaux (verbe ,nom, déterminant, etc.), une **couche d’interprétation**, où les règles logiques semi-formelles (de la forme Si...Alors), formalisées manuellement à partir de la 1ère couche, sont documentées, et une **couche opérationnelle** où les règles formelles sont présentées sous une forme universelle prêtes d’être exécutées. Autrement dit, les outils et les langages candidats ont été classés dans les quatre couches ci-dessus. Par exemple, au niveau de la couche source on trouve le PDF, HTML, XML et le format Word. Dans la couche de balisage on trouve RASE and LegalDocML. Pour la

⁸ <https://f3h3w7a5.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2017/11/17-11-08-Open-Standards-for-Regulation.pdf>

⁹ https://fr.wikiversity.org/wiki/SPARQL_Protocol_and_RDF_Query_Language/Mod%C3%A8le_de_donn%C3%A9es_RDF

couche d'interprétation, on trouve les langages de la programmation procédurale et Ifc constraint model. DROOLS, OWL, SWRL et SPARQL sont classés dans la couche opérationnelle.

Au niveau national, le Plan de Transition Numérique dans le Bâtiment (PTNB) a été présenté pour la première fois par Sylvia PINEL lors du conseil des ministres du 10 décembre 2014¹⁰. En 2015, le PTNB a lancé le projet “Numérisation de règles”¹¹. L’objectif du projet était de faciliter la numérisation et la gestion des règles de vérification dans le domaine de la construction en France quelle que soit la nature des référentiels (réglementaire, technique, de certification). Le projet a réuni quatre Groupes de Travail (GT) pour la formalisation des règles à partir des réglementations du domaine de construction. La méthodologie de travail des groupes de travail (GT) peut être décrite de la manière suivante : Dans un premier temps, pour chaque GT, une boîte à outils fournie par le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB)¹² a été mise à disposition. Cette boîte à outils avait pour objectif de permettre aux différents GT de partager des fichiers et d'utiliser l'éditeur "Cuda Text" pour accomplir la première étape de semi-formalisation des textes rédigés en langage naturel. L'objectif principal des experts de chaque GT était de simplifier les textes techniques et réglementaires existants en les reformulant de manière plus directe et non ambiguë. Cependant, il est important de noter que les experts des domaines métiers de chaque GT ne possédaient pas nécessairement des compétences en informatique ou une expertise en BIM. Pour remédier à cela, le CSTB a inclus dans la boîte à outils mentionnée précédemment une première version d'un "vocabulaire contrôlé". Ce vocabulaire contrôlé consistait en une liste structurée de termes en langue française qui avaient des équivalents dans le langage de la maquette numérique, à savoir le langage IFC. La création de ce vocabulaire contrôlé a été basée sur la dernière version en date des IFC (IFC Version 4 - Addendum 213¹²). Au début, le vocabulaire contrôlé comprenait environ 2000 termes en français qui avaient une correspondance directe en IFC. Pour enrichir davantage ce vocabulaire contrôlé, un processus de collaboration a été établi entre les GT et les experts BIM du CSTB. L'objectif était de recueillir des concepts qui n'avaient pas d'équivalent dans le vocabulaire de base. Chacun des groupes de travail a été chargé de compiler ces concepts sous forme de listes de "Termes Candidats". Ces termes candidats et leurs définitions associées ont ensuite été examinés par les experts du CSTB afin de déterminer s'ils pouvaient être directement traduits en termes IFC ou s'ils nécessitaient un traitement spécifique de la maquette numérique en raison de leur complexité (par exemple, le concept d'“escalier enclouonné”). Les résultats des travaux de chaque GT sont résumés comme suit :

- GT1 – Acoustique : Les experts de ce groupe ont travaillé sur un large corpus de texte de référence pour en extraire les points les plus importants (ceux qui causent le plus de non-conformités en visites de chantier). Ils ont produit environ 50 règles accompagnées de 50 messages d’information et a proposé 20 termes candidats.
- GT3 – Accessibilité : Les experts de ce groupe ont travaillé sur un seul texte de référence, à savoir : l’Arrêté du 20 avril 2017 relatif à l’accessibilité aux personnes handicapées des établissements recevant du public lors de leur construction et des installations ouvertes au public lors de leur aménagement. Le groupe a formalisé environ 50 règles et proposé 20 termes candidats.

¹⁰[https://www.ecologie.gouv.fr/batiment-et-numerique#:~:text=Le%20Plan%20de%20transition%20num%C3%A9rique%20du%20b%C3%A2timent%20\(PTNB\)%20a%20%C3%A9t%C3%A9,l%20construction%20neuve%20et%20a](https://www.ecologie.gouv.fr/batiment-et-numerique#:~:text=Le%20Plan%20de%20transition%20num%C3%A9rique%20du%20b%C3%A2timent%20(PTNB)%20a%20%C3%A9t%C3%A9,l%20construction%20neuve%20et%20a)

¹¹ <https://plan-bim-2022.fr/actions/ptnb-axe-c-la-numerisation-des-regles/la-numerisation-des-regles/>

¹²https://standards.buildingsmart.org/IFC/DEV/IFC4_2/FINAL/HTML/annex/annex-f/ifc4-addendum-2/index.htm

- GT4 – DTU Cloisons de plâtre : Les experts de ce groupe ont travaillé sur les deux Documents Techniques Unifiés (DTU) de référence, à savoir : DTU 25.41 et DTU 25.42. Ils ont défini environ 30 termes candidats et listé 37 règles de mise en œuvre.
- GT5 – Sécurité incendie : Les experts de ce groupe ont travaillé sur un large corpus de textes de référence pour en extraire les points les plus importants. Ils ont fourni également un grand nombre de règles semi-formelles ainsi qu'une centaine de termes candidats.

Les groupes de travail susmentionnés, ainsi que de nombreux auteurs ont prouvé la pertinence des approches utilisant les technologies du Web sémantique pour la formalisation des règles. Par exemple, en se basant sur les travaux réalisés dans le cadre du PTNB français, (Bus et al., 2018) définit un processus de vérification du respect de certaines conditions d'accessibilité par une maquette IFC. L'approche démarre par la conversion de la maquette numérique du format STEP/XML au format ifcOWL. Ensuite, à partir du travail effectué par les experts du PTNB sur les textes réglementaires, des règles semi-formelles sont préparées en utilisant un éditeur de texte spécifique. Ces règles décrivent les exigences réglementaires ou les critères de conformité à respecter. Ces règles sont ensuite adaptées en tant que règles formelles, employant des éléments de l'ifcOWL (concepts et propriétés). Une fois les règles formelles établies, elles sont adaptées en requêtes SPARQL. Les auteurs (Bus et al., 2018) ont utilisé les requêtes SPARQL permettent d'interroger la maquette numérique au format ifcOWL pour rechercher les éléments de construction non conformes ou qui ne respectent pas les règles de conformité précédemment établies. Les travaux de (Beach et al., 2015) présentent une méthodologie générique de vérification automatisée de la conformité par rapport aux réglementations basée sur des règles sémantiques. Ils valident l'efficacité de la méthodologie dans les résultats obtenus. Leur méthodologie de formalisation des règles est basée sur l'idée que trois contextes sémantiques sont nécessaires pour comprendre pleinement les réglementations à automatiser : la sémantique du domaine cible (domaine de construction), la sémantique spécifique des réglementations envisagées et la sémantique du format de données qui doit être vérifiées pour la conformité (l'ontologie ifcOWL). (Guo et al., 2021) présentent une approche sémantique pour la vérification automatisée de la conformité des bâtiments aux règles, où des requêtes SPARQL sont générées automatiquement en fonction des exigences imposées par les des parties prenantes. (Fuchs et al., 2022) ont discuté les défis que représente l'informatisation des réglementations de construction pour permettre le raisonnement et la vérification automatisée de la conformité dans l'environnement bâti. L'accent est mis sur l'analyse sémantique des réglementations afin de créer des requêtes SPARQL à l'aide de réseaux neuronaux. Ainsi, (Peng & Liu, 2023) ont transformé le modèle BIM (maquette IFC) en un graphe RDF qui constitue le graphe de connaissance correspondant au modèle BIM. Ils ont procédé par la suite, par un processus de mapping (mise en correspondance) entre les entités du graphe de connaissance et les termes présentés dans les textes réglementaires afin de créer des requêtes SPARQL pour la vérification automatisée de la conformité aux codes de construction. En outre, l'appel au programme *Horizon Europe Framework Programme (HORIZON)*¹³ adresse directement la thématique de la vérification de réglementations à travers des projets permettant la numérisation des textes réglementaires. Dans ce contexte, trois projets ont été sélectionnés, à savoir ACCORD (*Automated Compliance Checks for Construction, Renovation or Demolition Works*), CHEK (*Change toolkit for digital building permit*), et DigiChecks (*Digital environment for management of permits and compliance in building and construction*).

¹³<https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/horizon-cl4-2021-twin-transition-01-10>

L'objectif du projet ACCORD¹⁴ est d'améliorer l'efficacité et la précision des vérifications de conformité dans l'industrie de la construction en exploitant des approches telles que la formalisation des règles sémantiques, la normalisation et l'intelligence artificielle. En automatisant les vérifications de conformité, le projet vise à rationaliser les processus réglementaires et à garantir que les travaux de construction, de rénovation ou de démolition respectent les normes et réglementations requises (Vakaj, 2023). Le projet CHEK¹⁵ vise à la numérisation de permis de construction pour les municipalités européennes. L'objectif de CHEK est de développer un ensemble d'outils permettant d'aller des permis de construction traditionnels (délivrés sur papier) vers une version numérique. Le projet met l'accent sur l'utilisation des technologies du Web sémantique et d'échanges de données basés sur des normes ouvertes. Enfin, le projet DigiChecks¹⁶ vise à améliorer l'efficacité, la transparence et la précision de la gestion des permis de construire et des vérifications de conformité. Il se concentre sur le développement de solutions permettant la numérisation des informations administratives, juridiques et réglementaires liées aux permis de construction. En se basant sur les avantages des technologies sémantiques prouvées par ces travaux nous justifions notre choix de l'approche sémantique.

3 Spécification du périmètre de l'approche

Cette section vise à préciser le périmètre de l'approche envisagée, en prenant en compte l'étude des domaines en question exposée dans la section précédente.

3.1 Conclusions de l'étude handicap

Nous rappelons que selon l'ENSI, les personnes handicapées constituent deux tiers des PMR. Ainsi les difficultés de déplacement rencontrées par les personnes handicapées, lors de l'accès aux bâtiments qui ne sont pas adaptés à leurs besoins, sont plus complexes que ceux rencontrés par d'autres profils des PMR (personne avec des bagages, femme enceinte, etc.). Ces difficultés sont dues à la présence des sols meublés, glissants ou inégaux, des marches, des pentes, des ascenseurs inaccessibles, des portes étroites ou lourdes avec des poignées difficilement préhensibles ainsi que des WC et des chambres non adaptés. En outre, la législation française de l'accessibilité des bâtiments se concentre principalement sur les personnes handicapées. Pour ces deux raisons, nous retenons les handicaps comme profil représentatif des PMR dont les bâtiments doivent répondre à ses besoins d'accessibilité. Afin de représenter les données handicap en relation avec leur déplacement dans les bâtiments, nous allons utiliser l'ontologie "Classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé" ou *International Classification of Functioning (ICF)*¹⁷ en anglais de l'OMS qui décrit les contraintes de mobilité des personnes handicapées. La ICF aborde le concept de mobilité comme l'une des composantes importantes de la fonction du corps et des activités de la vie quotidienne.

3.2 Conclusions sur les textes législatifs

Nous avons étudié les textes législatifs régissant l'accessibilité de tous types de bâtiments (MI, BHC et ERP) afin d'identifier le ou les types de bâtiment ayant des dispositions pouvant

¹⁴ <https://accordproject.eu/>

¹⁵ <https://chekdbp.eu/>

¹⁶ <https://digichecks.eu/>

¹⁷<https://bioportal.bioontology.org/ontologies/ICF/?p=classes&conceptid=http%3A%2F%2Fwho.int%2Ficf%23d4#>

être adaptées informatiquement. Cette étude aboutit à la création de deux matrices d'accessibilité ; une pour les bâtiments de type logement (MI et BHC) et l'autre pour les bâtiments de type ERP. Elles sont représentées respectivement dans les tables 1 et 2. Concernant la structure des deux matrices, les deux regroupent au niveau des lignes les parties d'un bâtiment à savoir l'accueil, les circulations intérieures horizontales et verticales des parties communes, les chambres, les portes et sas, l'éclairage, les terrasses et loggias, les douches et sanitaires, les caisses de paiement et les sorties. Les colonnes de la matrice d'accessibilité pour les logements (Table 1) représentent les bâtiments de type MI et BHC neufs, existants ou temporaires. Quant aux colonnes de la matrice d'accessibilité pour les ERP (Table 2) représentent les bâtiments de type ERP neufs ou existants. Le croisement entre les lignes et les colonnes de chaque matrice comporte les articles du CCH, leurs arrêtés correspondants abrogés tel que l'arrêté du 24/12/2015 ou en vigueur tel que l'arrêté du 14/03/2014, du 08/12/2014 et du 20/04/2017 et leurs annexes associées ainsi que les documents techno-règlementaires qui décrivent les exigences techniques nécessaires pour que le bâtiment soit accessible tels que la Notice D'accessibilité Illustrée (NDI) et ses fiches techniques associées.

TABLE 1 – Matrice d'accessibilité pour les logements.

| | Logements | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| | Neufs | | Existants | Temporaires | |
| | MI Art. R*111-18-4 Art. R*111-18-5 | BHC Art. R*111-18 Art. R*111-18-1 | | MI Art. R*111-18-6.-III. | BHC Art. R*111-18-2.-II. |
| Généralités | | | | | |
| Chemineements extérieurs | Arrêté du 24/12/2015 - Art. 2 | | | | |
| Stationnement automobile | Arrêté du 24/12/2015 - Art. 3 | | | | |
| Accès aux bâtiments | Arrêté du 24/12/2015 - Art. 4 | | | | |
| Accueil du public | | | | | |
| Circulations intérieures horizontales des parties communes | Arrêté du 24/12/2015 - Art. 5 Arrêté du 24/12/2015 - Art. 6 | | | | |
| Circulations intérieures verticales des parties communes (Escalier & Ascenseur) | Annexe 3 de l'Arrêté du 24 décembre 2015 (Information et signalisation) Art. R. 111-5 (Ascenseur) | | | | Arrêté du 14/03/2014- Art. 2 |
| Tapis roulants, escaliers et plans inclinés mécaniques | | | | | |
| Revêtements des sols, murs et plafonds des parties communes | Arrêté du 24/12/2015 - Art. 7 | | | | |
| Portes et sas | Arrêté du 24/12/2015 - Art. 8 Annexe 2 de l'Arrêté du 24 décembre 2015 (Besoins) | | | | |
| Equipements et dispositifs de commande | Arrêté du 24/12/2015 - Art. 9 d'espaces libres de tout obstacle) | | | | |
| Eclairage | Arrêté du 24/12/2015 - Art. 10 | | | | |
| Caractéristiques de base des logements | Art. R*111-18-6.-II. | Art. R*111-18-2.-I. | | | Arrêté du 14/03/2014- Art. 3, Art.5 |
| Escaliers intérieurs des logements sur plusieurs niveaux | R. 111-18-2 | | | | |
| Caractéristiques des logements situés en rez-de-chaussée ou en étage desservis par ascenseur | | Art. R*111-18-2.-I. | | | |
| Accès aux balcons, terrasses et loggias | Art. R*111-18-6.-II. | Art. R*111-18-2.-I. | | | |
| Douche accessible | Art. R*111-18-6.-II. | Art. R*111-18-2.-I. | | | |
| Sanitaires accessibles | | | | | |
| cabines et espace à usage individuel (habillage , soin , douche) | | | | | |
| Chambres ou locaux à sommeil | | | | | |
| Caisses de paiement | | | | | |
| Travaux modificatifs de l'acquéreur | Art. R*111-18-6.-IV. | Art. R*111-18-2.-III. | Art. R*111-18-8. | | |
| Travaux | | | Art. R*111-18-9. | | |
| Sorties | | | | | |

Par rapport à la matrice d'accessibilité pour les logements (Table 1), nous avons tiré les conclusions suivantes ; Concernant Pour les MI et les BHC neufs, l'arrêté du 24/12/2015 est abrogé, il n'est plus considéré comme référence législative. En plus, les articles du CCH (de la forme Art. R*111-18-x) ne spécifient pas les exigences techniques nécessaires à l'accessibilité

des bâtiments ; ils se limitent à énoncer la nécessité de rendre les bâtiments accessibles, constituant ainsi des textes purement juridiques.

Nous citons comme exemple, l'énoncé de l'article R 111-18 "Les bâtiments d'habitation collectifs et leurs abords doivent être construits et aménagés de façon à être accessibles aux personnes handicapées, quel que soit leur handicap". Pour les MI et les BHC temporaires, l'arrêté du 14/03/2014 a bien décrit les exigences techniques nécessaires à l'accessibilité de quelques parties du bâtiment mais il a négligé d'autres parties importantes dans un logement comme les douches et les chambres. Quant aux logements existants, on distingue une documentation législative faible voire nulle car elle ne comporte que des articles du CCH pour les travaux modificatifs. Selon la matrice d'accessibilité pour les ERP (Table 2), nous avons identifié les ERP existants comme les bâtiments disposant de la meilleure documentation législative informatiquement exploitable. Nous choisissons donc de nous concentrer sur ces bâtiments. Cette documentation se repose principalement sur l'arrêté du 20/04/2017 en vigueur jusqu'à maintenant qui régit l'accessibilité de toutes les parties d'un ERP. Cette documentation comporte également la NDI dont pour chaque article de l'arrêté 20/04/2017, on associe une illustration détaillée des dimensions optimales en termes d'accessibilité.

TABLE 2 – Matrice d'accessibilité pour les ERP.

| | ERP | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| | Neufs | | Existants | | |
| Généralités | Art. R. 111-19. Art. R*111-19-1 Art. R*111-19-2 | | Art. R. 111-19-7. -I. Section 1 de la NDI | | |
| Cheminevements extérieurs | Arrêté du 20/04/2017 - Art. 2 | | Arrêté du 08/12/2014 - Art. 2 | Section 2 de la NDI | Fiche 1 |
| Stationnement automobile | Arrêté du 20/04/2017 - Art. 3 | | Arrêté du 08/12/2014 - Art. 3 | Section 3 de la NDI | Fiche 2 |
| Accès aux bâtiments | Arrêté du 20/04/2017 - Art. 4 | Annexe 3 de l'Arrêté du 20/04/2017 (Information et signalisation) | Arrêté du 08/12/2014 - Art. 4 | Section 4 de la NDI | |
| Accueil du public | Arrêté du 20/04/2017 - Art. 5 | | Arrêté du 08/12/2014 - Art. 5 | Section 6 de la NDI | |
| Circulations intérieures horizontales des parties communes | Arrêté du 20/04/2017 - Art. 6 | | Arrêté du 08/12/2014 - Art. 6 | Section 8 de la NDI | |
| Circulations intérieures verticales des parties communes (Escalier & Ascenseur) | Arrêté du 20/04/2017 - Art. 6 | Annexe 3 de l'Arrêté du 20/04/2017 (Information et signalisation) | Arrêté du 08/12/2014 - Art. 7 | Section 9 de la NDI | Section 10 de la NDI Fiche 3 |
| Tapis roulants, escaliers et plans inclinés mécaniques | Arrêté du 20/04/2017 - Art. 8 | Annexe 3 et 7 de l'Arrêté du 20/04/2017 | Arrêté du 08/12/2014 - Art. 8 | | |
| Revêtements des sols, murs et plafonds des parties communes | Arrêté du 20/04/2017 - Art. 9 | | | | |
| Portes et sas | Arrêté du 20/04/2017 - Art. 10 | Annexe 2 de l'Arrêté du 20/04/2017 | Section 5 de la NDI | | Section 12 de la NDI |
| Equipements et dispositifs de commande | Arrêté du 20/04/2017 - Art. 11 | Annexe 2 et 3 de l'Arrêté du 20/04/2017 | | | |
| Eclairage | Arrêté du 20/04/2017 - Art. 14 | | Arrêté du 08/12/2014 - Art. 14 | Section 7 de la NDI | |
| Caractéristiques de base des logements | | | | | |
| Escaliers intérieurs des logements sur plusieurs niveaux | | | | | |
| Caractéristiques des logements situés en rez-de-chaussée ou en étage desservis par ascenseur | | | | | |
| Accès aux balcons, terrasses et loggias | | | | | |
| Douche accessible | | | | | |
| Sanitaires accessibles | Arrêté du 20/04/2017 - Art. 12 | Annexe 2 de l'Arrêté du 20/04/2017 | Arrêté du 08/12/2014 - Art. 12 | Section 13 de la NDI | |

3.3 Conclusions sur la représentation numérique des bâtiments

Selon l'écosystème OpenBIM, les bâtiments sont représentés par des modèles IFC. Afin de vérifier la conformité d'une maquette IFC d'un bâtiment, les approches classiques procèdent par les MVDs. Toutefois le MVD a des limites (Zhang et al, 2013) dont nous citons deux limites majeures :

Définition des MVD à partir des IDM : Si des ambiguïtés ou des incohérences existent dans l'IDM, cela peut conduire à une définition inappropriée des MVD qui provoque de son tour des résultats de vérification incorrects. Une attention particulière doit être portée à la clarté et à la précision des spécifications d'IDM et par la suite le développement du MVD.

Exigences dynamiques complexe et spécifiques au contexte : Les exigences de conformité des bâtiments présentes dans les textes réglementaires peuvent être dynamiques et spécifiques au contexte. Les MVD pourraient ne pas être en mesure de capturer toutes les variations et nuances des règles de conformité qui dépendent de contextes de projet spécifiques, de réglementations locales ou de normes évolutives. Ainsi, selon la complexité des exigences de conformité, il peut être difficile de définir un MVD exhaustif couvrant tous les aspects nécessaires.

Afin de surmonter les limites de l'approche classique, l'approche sémantique a été considérée comme une solution alternative plus efficace en termes de vérification de la conformité des bâtiments. L'approche sémantique est une approche qui se base sur les avantages offerts par les technologies du Web Sémantique. En effet elle permet de remplacer les MVD par des règles SWRL ou requêtes SPARQL exécutées au-dessus de maquettes numériques au format ifcOWL. Ainsi l'ifcOWL a ouvert la voie vers des améliorations en termes de :

Enrichissement sémantique de maquettes numériques. (Mendes De Farias et al, 2014) ont défini des règles logiques exprimées en SWRL permettant d'identifier de nouveaux concepts à partir du modèle de données BIM (IFC) afin d'augmenter l'expressivité du modèle de données en ajoutant des concepts manquants.

La simplification des maquettes numériques. (Pauwels & Roxin, 2016) ont proposé SimpleBIM : un processus de simplification des modèles de bâtiments représentés dans les graphes ifcOWL. Ces simplifications peuvent s'effectuer dynamiquement sur des graphes ifcOWL et les pourcentages moyens de simplification sont de 89.68% en termes de nombre de triple et de 91,58% en termes de taille de fichier. Le résultat du processus SimpleBIM est un graphe ifcOWL qui ne contient que les informations spécifiées dans le graphe MVD/XML.

L'extraction de vues de maquettes numériques. (Mendes De Farias et al, 2018) ont proposé une nouvelle approche appelée IfcView qui s'appuie sur les technologies du Web Sémantique pour créer des vues de bâtiments (sous-graphe nécessaire et suffisant). Pour ce faire, ils ont appliqué des règles SWRL sur une ontologie ifcOWL. En effet, leur approche basée sur des règles SWRL a créé des sous-graphes (des vues) en spécifiant les éléments IFC à extraire en tant que GUID, relations ou entités. Les auteurs ont démontré, à travers plusieurs cas d'études que leur approche permet de réaliser une extraction des vues de bâtiments qui est plus intuitive et flexible que l'approche par MVD.

En se basant sur ce qu'il précède ainsi que l'étude des avantages apportés par les technologies sémantiques utilisées notamment au niveau de la vérification de réglementations, montrées dans la section 2.4, nous justifions notre choix de l'approche sémantique.

Plus précisément, dans notre cas d'étude, les avantages des technologies sémantiques nous permettent principalement de combiner les connaissances provenant de différents domaines. En effet, nous avons besoin d'enrichir les connaissances du bâtiment avec d'autres

connaissances pertinentes pour vérifier l'accessibilité des bâtiments aux personnes handicapées, telle que l'ontologie ICF représentant les contraintes de mobilité des personnes handicapées ainsi que l'ontologie des capteurs telle que l'ontologie SSN pour Semantic Sensor Network (SSN)¹⁸ vu que les capteurs jouent un rôle indispensable dans l'accessibilité des bâtiments. Par exemple les capteurs de mouvements PIR (Passive Infra Red) permettent d'ouvrir des portes ou d'allumer la lumière d'une façon automatique. Le modèle IFC peut contenir des capteurs présents dans un bâtiment, cependant il n'apporte pas des informations sur le type de capteur et son fonctionnement. Donc, il est nécessaire de représenter le bâtiment avec une ontologie ifcOWL afin de la combiner avec les autres ontologies ICF et SSN représentées aussi en OWL. Les avantages du Web Sémantique nous permettent également d'interroger ces ontologies en utilisant des règles logiques ou des requêtes conformes aux réglementations.

3.4 Conclusion sur les approches pour la vérification de réglementations

Par rapport aux livrables L2/L3 PTNB disponibles en ligne¹⁹, le rapport “*Regulatory room working group report on open standards for regulatory, requirements and recommendatory content*” du bSI ainsi que les travaux présentés dans la section 2.4, nous identifions trois limites majeures :

- L'existence des éléments présents dans les réglementations qui n'ont pas d'équivalent dans la norme IFC, comme par exemple “surfaces ouvertes accessibles au public”.
- L'existence des termes qualitatifs dans la réglementation comme par exemple “Les circulations intérieures horizontales doivent être accessibles et **sans danger** pour les personnes handicapées.”. La notion “sans danger” est un exemple typique d'un terme qui ne peut pas être formalisée.
- Les approches existantes (sauf celles utilisant les techniques du TALN) ne sont pas automatisées lors du passage de règles semi-formelles en règles formelles. En effet, malgré les nombreuses approches pour la création automatique de règles semi-formelles à partir des réglementations, notamment BERA, RASE et FORSA (Emani, 2017), le processus de vérification de conformité implique encore beaucoup d'opérations manuelles pour passer de règles semi-formelles aux règles formelles.

Ainsi, selon l'étude faite par Zhang et al. en 2023 (Zhang et al., 2023), les approches existantes manquent souvent de la capacité de traiter les règles ambiguës (Zhang et al., 2023). À l'égard de ces limites, et en prenant en considération les critères de performance des approches sémantiques pour la vérification de conformité, identifiés par Pauwels et al. (Pauwels et al., 2017) nous déclenchons la discussion de nos problématiques scientifiques dans la section suivante qui nous permettent de démontrer l'originalité de notre approche envisagée.

4 Approche envisagée

4.1 Problématiques scientifiques

Dans le but d'automatiser le passage de règles semi-formelles en règles formelles, les approches basées sur les techniques du TALN ou Natural Language Processing (NLP) en anglais, telles que (Guo et al., 2021), (Fuchs et al., 2022) et (Peng & Liu, 2023) sont les approches qui permettent de construire automatiquement et sans opération manuelle des règles formelles à partir d'un texte réglementaire. Toutefois, ces approches n'arrivent à résoudre le problème d'existence des termes présents dans les réglementations qui n'ont pas d'équivalent dans la norme IFC. Par conséquent, une première problématique consiste à mettre en

¹⁸ <https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/>

¹⁹ <https://plan-bim-2022.fr/wp-content/uploads/2020/04/La-num%C3%A9risation-des-re%C3%80gles.zip>

correspondance les entités de la maquette IFC avec les termes techniques présent dans les textes réglementaires et qui n'ont pas d'équivalent direct dans l'IFC.

Dans le processus de vérification de la conformité des bâtiments, les problématiques rencontrées ne s'articulent pas uniquement autour la vérification des réglementations mais peuvent porter aussi sur l'hétérogénéité des données de construction qu'on viser à vérifier. En effet, dans certain cas, il est nécessaire de combiner les données du bâtiment avec d'autres données complémentaires. Dans ce cas, l'interopérabilité des données joue un rôle crucial dans la vérification de la conformité des bâtiments (Sattler et al., 2019). L'interopérabilité est définie par l'ISO TR 23262 :2022 comme la "capacité de deux ou plusieurs systèmes à communiquer et à échanger des données dans des formats de données et protocoles de communication spécifiques". Le standard ISO 11354-1 (ISO, 2011) a défini trois approches différentes d'interopérabilité entre les modèles : La fédération, l'intégration et l'unification. Les ontologies étant des modèles, elles peuvent être couplées de la même manière que deux modèles (Roxin, 2018). En permettant l'interopérabilité des ontologies, les connaissances provenant de différentes sources peuvent être combinées et utilisées de manière efficace pour les processus de vérification de conformité dans l'industrie de la construction. Par exemple dans les travaux de (Corry et al., 2015), trois ontologies clés : ifcOWL (ontologie du bâtiment), SimModel (ontologie couvrant tous les aspects du processus de simulation des bâtiments et SSN (ontologie de capteurs) ont été intégrées sous forme d'une seule ontologie pour l'évaluation des performances énergétiques des bâtiments. Ainsi les travaux de (Demir & Ilal, 2022) permettent l'intégration du BIM avec les données de systèmes d'information géographique (SIG) pour la vérification automatisée du code d'urbanisme. Cette intégration permet de prendre en compte des informations détaillées sur les bâtiments et leur environnement lors de la vérification de conformité. Les limites de ces approches résident dans le coût de l'intégration des différentes ontologies ainsi l'absence de flexibilité en cas de changement de contenu de l'une des ontologies. Le défi de l'hétérogénéité des données à vérifier, donne naissance à un nouveau défi : Comment peut-on interroger un corpus de données volumineux et hétérogène afin de pouvoir détecter les éléments non-conformes dans un objet construit ? D'après ces limites, la deuxième problématique scientifique que nous visons à répondre consistent en mettre en place un mécanisme d'interopérabilité sémantique entre les connaissances hétérogènes qui doit être flexible aux changements de leurs contenu. Notre dernière problématique scientifique consiste en interroger les connaissances hétérogènes d'une manière cohérente et complète et en temps fini.

4.2 Présentation de l'approche

Notre objectif est de détecter des non-conformités présentes dans les maquettes numériques des ERP par rapport à la législation d'accessibilité pour des PMR. Afin de répondre aux problématiques scientifiques liées à cet objectif, nous présentons notre approche envisagée. La figure 3 représente une vue d'ensemble de l'approche.

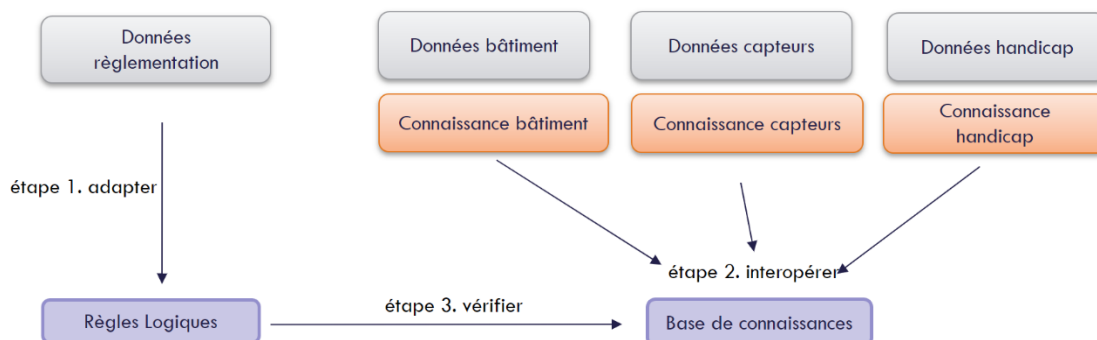


FIGURE 2 – Vue d'ensemble de notre approche.

La première étape de notre approche (figure2 – étape1) consiste à l'adaptation des textes réglementaires écrit en langage naturel en des règles formelles. Cette étape relève notre première problématique scientifique qui porte sur les notions présentes dans la réglementation et manquantes dans la maquette du bâtiment. Afin de répondre à cette problématique

scientifique, nous proposons d'identifier le sous-graphe de la maquette IFC au format OWL(ifcOWL) correspondant au terme présentant dans la réglementation. Concernant le choix du formalisme logique, les liens entre la logique et la performance des raisonneurs doivent être considérés dans ce processus. Il existe de nombreux travaux faits selon différents types de formalisme logique, comme le langage des requêtes tel que SPARQL (Zhao et al., 2023), le langage des règles tel que Jena Inference Rule (Costa & Powels, 2015) et le langage de contraintes pour la validation des graphes RDF qui pourraient être utilisés pour résoudre ce problème, tel que SHACL pour Shapes Constraint Language (Robaldo, 2021). L'étape 2 de la figure 2 consiste à interopérer les connaissances hétérogènes du bâtiment, capteurs et handicap (ontologies de domaines) pour construire un graphe de connaissance. Cette étape met en évidence la deuxième problématique scientifique permettant la mise en place d'un mécanisme d'interopérabilité sémantique flexible à l'égard de la dynamique des connaissances. Afin de construire le graphe de connaissances, nous proposons d'opter les techniques de calcul de similarité sémantique entre les concepts des différentes ontologies pour les mettre en correspondance, éliminer les redondances et gérer les conflits sémantiques. Ensuite, la troisième étape envisagée consiste à appliquer les règles ou les requêtes obtenues dans la 1ère étape au graphe de connaissance de la 2ème étape (Figure 2 – étape 3) afin de détecter des éventuelles non-conformités dans les bâtiments en termes d'accessibilité aux PMR. Dans le cadre de la vérification de la conformité des bâtiments, nous distinguons plusieurs cas d'usage, induits par notre objectif. Le premier concerne la détection de non-conformités pour éléments fonctionnels des ERP, il s'agit d'une vérification qui s'appuie essentiellement sur la vérification des différents composants des éléments fonctionnels comme par exemple pour une salle la largeur des entrées, les modes d'accès (portes automatiques ou autres), etc. Ceci se traduit par des requêtes conjonctives avec inégalités qui parcourent des liens de composition (Wang & Yi, 2022). Une requête conjonctive avec inégalités est une requête complexe vise à extraire des informations répondant à certains critères spécifiques. Cette requête combine des conditions logiques conjonctives (ET) avec des opérateurs d'inégalité tels que "plus grand que", "plus petit que", "différent de", etc. Ces requêtes permettent de filtrer les résultats selon des valeurs numériques particulières. (Fokou Pelap, 2016). Un second cas concerne l'accès aux éléments fonctionnels d'un ERP pour en déduire une non-conformité. Par exemple une salle de réunion doit posséder un chemin qui la rend accessible depuis l'extérieur du bâtiment pour une personne en fauteuil roulant. Ce cas d'usage met en évidence des requêtes qui recherchent des chemins avec des contraintes (Liu et al.2022), ces requêtes complexes et coûteuses en termes d'exécution (Figueira et al.,2023) faisant appel à la récursion. Une requête avec récursion est une requête utilisée dans le cadre de l'interrogation des graphes de connaissances qui implique la répétition d'une opération de recherche à plusieurs niveaux de profondeur. Cela permet d'explorer les relations entre les entités du graphe de manière itérative. (Fiondaa et al., 2019). Un troisième cas concerne la mise à jour de la non-conformité en présence d'évolutions, par exemple s'il y a une période de travaux dans le bâtiment certains des éléments doivent rester accessibles. Dans ce cas nous devons dégager tous les chemins accessibles possibles. Pour ce faire, nous pouvons utiliser des requêtes conjonctives avec un score. Une requête avec score ou "ranking" fait référence à une requête de recherche dont les résultats de la requête sont renvoyés classés en fonction de leur score de pertinence par rapport à la requête (Xiong et al. 2017). Si nous appliquons ces requêtes complexes (requêtes conjonctives avec inégalités, avec récursion ou avec un score) sur un graphe de connaissances volumineux nous risquons de tomber dans un problème de complexité temporelle exponentielle lors de l'exécution des

requêtes. Il convient donc de doter les graphes de connaissances d'opérateurs pour en extraire des sous-graphes afin de satisfaire les traitements c'est-à-dire définir un mécanisme de vue. Cette problématique a été récemment identifiée comme des requêtes multimodales sur des graphes de connaissances (Khan,2023). Nous allons donc explorer comment adapter ces types de requêtes sur des graphes de connaissances tout en maintenant des exécutions efficaces

5 Conclusion et travaux futurs

Face aux défis liés à l'insuffisance des technologies existantes pour répondre aux besoins des PMR, le projet EASING vise à améliorer l'accessibilité des bâtiments pour les PMR. Cet article présente les travaux que nous avons réalisés jusqu'ici dans le cadre de ce projet. Il constitue une vision prospective de notre approche pour la détection des non-conformités dans des bâtiments de type ERP en termes d'accessibilité d'un handicap moteur en tant que profil représentant des PMR.

Nous avons présenté d'une part, nos études préliminaires des trois domaines clés : les PMR et les types des handicaps, les réglementations régissant les exigences d'accessibilité et la représentation numérique des bâtiments. D'autre part un état de l'art concernant les approches sémantiques existantes a été présenté. Ces études ont permis d'identifier le périmètre de notre approche envisagée. Les travaux réalisés jusqu'à présent ont permis de progresser d'une part, dans l'étude des textes législatifs afin de repérer les dispositions pouvant être adaptées informatiquement. D'autre part dans l'identification des connaissances nécessaires pour la vérification de l'accessibilité des ERP à savoir les ontologies du bâtiment ERP, l'ontologie des capteurs et l'ontologie du handicap.

Les travaux futurs se concentreront sur l'adaptation des textes législatifs en des règles formelles ainsi sur l'interopérabilité des ontologies pour concevoir un graphe de connaissance sur laquelle les règles formelles vont être appliquées pour détecter si d'éventuelles non-conformités présentent dans la maquette de l'ERP.

Références

- Article R 111-18-2 de la section 3 du 1er chapitre du 1er livre du code de la construction et de l'habitation (2019). Disponible en ligne : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000006895904#:~:text=Une%20partie%20des%20espaces%20n%C3%A9cessaires,une%20personne%20en%20fauteuil%20roulant.
- Beach T.H., Rezgui Y., Li H., Kasim T.(2015). A rule-based semantic approach for automated regulatory compliance in the construction sector. *Expert Systems with Applications*, pages 5219-5231
- Beetz J., Van P., Leeuwen J. & Vries V. (2009). IfcOWL: A case of transforming EXPRESS schemas into ontologies. *Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing*.
- Berners-Lee T. (1998). The Semantic Web road map. The World Wide Web Consortium (W3C).
- BuildingSMART. IFC Schema Specifications. Disponible en ligne : <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-schema-specifications/>
- Bus N., Muhammad F., Fies B., & Roxin A. (2018). Semantic topological querying for compliance checking. *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction. 12th European Conference on Product and Process Modelling (ECPM 2018)*
- Classification Internationale du Fonctionnement, du Handicap et de la Santé (CIF). Organisation mondiale de la santé (OMS) (2001). Disponible en ligne : https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/42418/9242545422_fre.pdf
- Code de la construction et de l'habitation (CCH). (2023) Disponible en ligne : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/texte_lc/LEGITEXT000006074096/
- Conférence Nationale du Handicap (CNH). (2020). Disponible en ligne : <https://www.gouvernement.fr/actualite/conference-nationale-du-handicap-tous-concernes-tous-mobilises>
- Décret n°2006-138 du 9 février 2006 relatif à l'accessibilité du matériel roulant affecté aux services de transport public terrestre de voyageurs (2014). Disponible en ligne : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000266164>
- Demir Y. & İlal E. (2022). Integrating building and context information for automated zoning code checking: a review.

- Direction Départementale de l'Équipement (DDE). Disponible en ligne : <https://www.eure.gouv.fr/contenu/telechargement/2238/15183/file/Accessibilite-sensibilisation.pdf>
- Directive 2001/85/CE du Parlement européen et du Conseil européen (2001). Disponible en ligne : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000882109>
- EMANI C. (2017). Formalisation automatique et sémantique de règles métiers. Université Claude Bernard Lyon1. Disponible en ligne : <https://theses.hal.science/tel-01508489/document>
- Feuille de route Handicap Bourgogne-Franche-Comté (2019). Disponible en ligne : https://prod.bourgognefranchecomte.fr/sites/default/files/2019-06/HANDICAP_PLAN_BFC_2019.pdf
- Figueira, D., & Romero, M. (2023). Conjunctive Regular Path Queries under Injective Semantics. 42nd ACM SIGMOD-SIGACT-SIGAI Symposium on Principles of Database Systems (PODS '23)
- Fiondaa V., Pirròb G & P. Consens M. (2019). Querying Knowledge Graphs with Extended PropertyPaths. SemanticWeb0(0) IOS Press.
- Fokou Pelap G., (2016). Conception d'un framework pour la relaxation des requêtes SPARQL. Université de Poitiers.
- Fuchs S., Witbrock M., Dimyadi J. & Amor R. (2022). Neural Semantic Parsing of Building Regulations for Compliance Checking. IOP Conference.
- Furnkranz J., Kliegr T. (2015). A brief overview of Rule Learning. RuleML 2015: Rule Technologies: Foundations, Tools, and Applications pp 54–69
- Guo D., Onstein E. & La Rosa A.D. (2020). An Approach of Automatic SPARQL Generation for BIM Data Extraction. MDPI Journal.
- Guo D., Onstein E. & La Rosa A.D. (2021). A Semantic Approach for Automated Rule Compliance Checking in Construction Industry. IEEE
- Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE). (2020). Disponible en ligne : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4277752?sommaire=4318291>
- International Organization for Standardization (ISO). (2008). Building information models — Information delivery manual — Part 1: Methodology and format
- International Organization for Standardization (ISO) Online Browsing Platform (OBP) (2023). Disponible en ligne : <https://www.iso.org/obp/ui#search>
- Kannengiesser U., Roxin A. (2016). An Agile Process Modelling Approach for BIM Projects. 11th European Conference on Product and Process Modelling (ECPPM 2016)
- Khan A, (2023), Knowledge Graphs Querying, SIGMOD Record. ArXiv.
- Le Coadic R., (2006). L'autonomie, illusion ou projet de société ? Cahiers internationaux de sociologie 2006 (n° 121), pages 317 à 340.
- Lee K., (2011). Building Environment Rule and Analysis (BERA) Language. Georgia Institute of Technology.
- Mendes De Farias T., Roxin A., & Nicolle C. (2014). A Rule Based System for Semantical Enrichment of Building Information Exchange. Proceedings of the RuleML 2014 Challenge and the RuleML.
- Mendes De Farias T., Roxin A., & Nicolle C. (2018). A rule-based methodology to extract building model views. Automation in Construction, 92, 214-229.
- Pauwels P., Mendes de Farias T., Zhang C., Roxin R., Beetz J., De Roo J. & Nicolle C. (2017). A performance benchmark over semantic rule-checking approaches in construction industry. Advanced Engineering Informatics.
- Pauwels P., & Roxin A. (2016). SimpleBIM: From full ifcOWL graphs to simplified building graphs. ECPPM 2016 (11 European Conference on Product and Process Modelling).
- Pauwels P., & Terkaj W. (2016). EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology. Automation in Construction, Pages 100-133
- Peng J. & Liu X. (2023). Automated code compliance checking research based on BIM and knowledge graph. Scientific Reports (2023) 13:7065

- PlanBIM (2023). BIM et maquette numérique: Guide de recommandations à la maîtrise d'ouvrage pour le domaine du Bâtiment. Disponible en ligne : https://plan-bim-2022.fr/wp-content/uploads/2023/04/PlanBIM_MIQCP_Guide-de-recommandations-MOA_Version-2023-sans-les-annexes.pdf
- Référentiel accessibilité et adaptation des logements en habitat collectif, Mairie de Paris (2014). Disponible en ligne : <https://bibliotheques-specialisees.paris.fr/ark:/73873/pf0002419029>
- Reza-Besharati M., Izadi M., Asgari E. (2022). Stateless and Rule-Based Verification For Compliance Checking Applications. arXiv:2204.07430.
- Roxin A. Reasoning and knowledge - tradeoff between expressivity and efficiency. Université de Bourgogne Franche-Comté, 2018. Disponible en ligne : <https://theses.hal.science/tel-01940781>
- Satti H. M., & Krawczyk R. J. (2004). Issues of integrating building codes in CAD. eDesign in Architecture: ASCAAD's First International Conference on Computer Aided Architectural Design.
- Sattler L., Lamouri S., Pellerin R. & Maigne T. (2019). Interoperability aims in Building Information Modeling exchanges: a literature review. IFAC-PapersOnLine 2019, Pages 271-276.
- Studer R., Benjamins R., & Fensel D. (1998). Knowledge engineering: Principles and methods. Data & Knowledge Engineering. Data & Knowledge Engineering, Pages 161-197
- Vakaj E., Lefrançois M., Dridi A.(2023). Semantisation of Rules for Automated Compliance Checking. Linked Data in Architecture and Construction (LDAC2023)
- Ventura S., Getuli V., Capone P., Ciribini A. (2016). Construction Health and Safety Code Checking: a BIM-based Validation Process. Procedia Engineering 2017, Pages 454-461.
- Wang Q. & Yi K. (2022) Conjunctive Queries with Comparisons. Proceedings of the 2022 International Conference on Management of Data. 2022. p. 108-121.
- Xiong C. , Power R. , Callan J.(2017). Explicit Semantic Ranking for Academic Search via Knowledge Graph Embedding. 26th International Conference on World Wide Web 2017, pages 1271–1279.
- Yurchyshyna A. (2009). Modélisation du contrôle de conformité en construction : une approche ontologique. Mémoire de thèse, Université Côte d'Azur, Disponible en ligne : <https://www.theses.fr/2009NICE4011>
- Zhang C., Vries D., Beetz J. (2013). Towards model view definition on semantic level : a state of the art review. European Group for Intelligent Computing in Engineering (EG-ICE).
- Zhang Z., Ma L.& Broyd T. (2023). Rule capture of automated compliance checking of building requirements: a review. UCL Discovery.
- Zhao X., Huang L., Sun Z., Fan X. & Zhang M. (2023). Compliance Checking on Topological Spatial Relationships of Building Elements Based on Building Information Models and Ontology. MDPI Journal.