

Développement du sujet de recherche

Laboratoire LAMIH-UMR CNRS 8201 Université Polytechnique Hauts-de-France, INSA, Va

6 octobre 2025

1 Titre de la thèse

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

Résumé

Cette thèse vise à concevoir, réaliser et évaluer une interface utilisateur sensible aux contraintes pour améliorer la remontée de conformité en ingénierie de la construction, en se concentrant sur les systèmes électriques. Le projet s'articule autour de trois axes principaux : l'extraction dynamique des contraintes fonctionnelles et organisationnelles, l'amélioration de l'interaction humain-machine, et l'adoption de méthodologies agiles inspirées du génie logiciel. L'objectif est de créer un outil interactif permettant aux acteurs non spécialistes d'identifier et d'anticiper les infractions aux contraintes électriques dès la phase de conception. La recherche s'appuiera sur les concepts d'interface écologique et de réduction de la charge mentale. Le projet intégrera des approches de traitement du langage naturel et d'ontologies pour faciliter l'extraction et la gestion des contraintes. L'approche proposée permettra une vérification systématique et automatisée des contraintes tout au long du cycle de vie du projet, réduisant ainsi les risques d'erreurs. Les résultats de cette recherche pourraient contribuer à l'amélioration de la qualité, de la gestion des risques et de l'efficacité des projets de construction.

Mots-clés : Interaction humain-machine, interface utilisateur, interface écologique, contraintes, sensibilité aux contraintes, construction, énergie, électrotechnique, bâtiment.

2 Contexte

L'industrie de la construction connaît une transformation profonde depuis les années 2000 avec l'émergence des outils de (BIM) et le cadre de travail qui en découle : le (VDC)^{1, 2}.

1. VDC : Virtual Design and Construction, the use of integrated multi-disciplinary performance models of design-construction projects to support explicit and public business objectives.¹

L'adoption des standards et des bonnes pratiques liées au BIM devait permettre d'augmenter l'efficacité lors des phases de conception et d'optimiser les phases d'exécution des projets de construction au prix d'une complexification des protocoles d'études.³ La réalisation des maquettes numériques, en se superposant aux métiers historiques liés à la construction pose le risque de favoriser ses propres objectifs plutôt que de se mettre au service des métiers historiques.⁴

Cette évolution du contexte et des pratiques apporte un ensemble de contraintes additionnelles à un environnement déjà fortement régulé : en ingénierie de la construction, les corps d'état technique doivent en effet satisfaire de nombreuses contraintes. Celles-ci sont formalisées par les parties prenantes et par des institutions externes. Ces contraintes ont des sources diverses⁵ :

- des sources réglementaires : issues des normes et des textes de loi (code du travail, code des marchés publics, code de la construction...),
- des sources normatives : issues des recueils de bonnes pratiques ou de référentiels standardisés (ISO 9001, NF C15-100, NF DTU...),
- des sources contextuelles : issues des spécifications propres à un projet (Cahier des charges, Spécifications Techniques, Contrat de prestation...).

Le recensement des contraintes sur un projet donné est une tâche manuelle fastidieuse, chronophage et source d'erreurs. Des matrices de correspondance permettent d'indiquer au lecteur averti les documents qui contiendront la réponse à chacune des contraintes identifiées. Ce travail présente de nombreuses vulnérabilités telles que le risque d'erreur d'interprétation ou d'oubli, le manque d'ergonomie et le manque d'efficacité. Après cette étape de modélisation, un ou plusieurs référents sont identifiés pour assurer le suivi de la prise en compte de ces contraintes. Ce suivi souffre d'un caractère non-exécutable, impliquant une exploration manuelle des corpus documentaires lors des opérations de vérifications et de contrôle. Les contraintes peuvent être classées selon trois natures :

- une nature technique : contraintes liées au respect de conditions et de règles d'un métier donné et définies dans les cahiers des charges et textes normatifs,
- une nature fonctionnelle : contraintes liées à la réponse à un besoin de fonctionnement d'une installation et définies dans les cahiers des charges et textes normatifs,
- une nature organisationnelle : contraintes de toutes autres natures et définies par les contrats, normes et lois.

Des protocoles et procédures sont mis en œuvre pour assurer la satisfaction de ces contraintes. La figure 1 présente le cycle de vie d'une contrainte exprimée par un client en schématisant sa précision par le maître d'œuvre et son intégration par l'entreprise générale.

La réalisation de notes de calculs, de simulations et de mesures physiques sont des exemples très représentatifs de systèmes de remontée de preuve adaptés aux contraintes techniques. Il n'existe cependant pas de système permettant une remontée de preuve d'un niveau qualitatif équivalent pour les contraintes fonctionnelles et organisationnelles. Ce périmètre est alors limité à l'apport en connaissance individuelle et repose entièrement sur un système de confiance pair-à-pair.

Les bâtiments contemporains sont parcourus par de nombreux réseaux électriques² de différentes natures : signalisation, données, puissance. La diversité de ces réseaux implique une gestion complexe de contraintes diverses et sophistiquées : il peut s'agir d'interface avec le génie climatique sur l'alimentation d'équipements et des remontées de capteurs, de mise en œuvre

2. Par abus de langage, nous considérons que les réseaux de fibres optiques font partie des réseaux électriques.

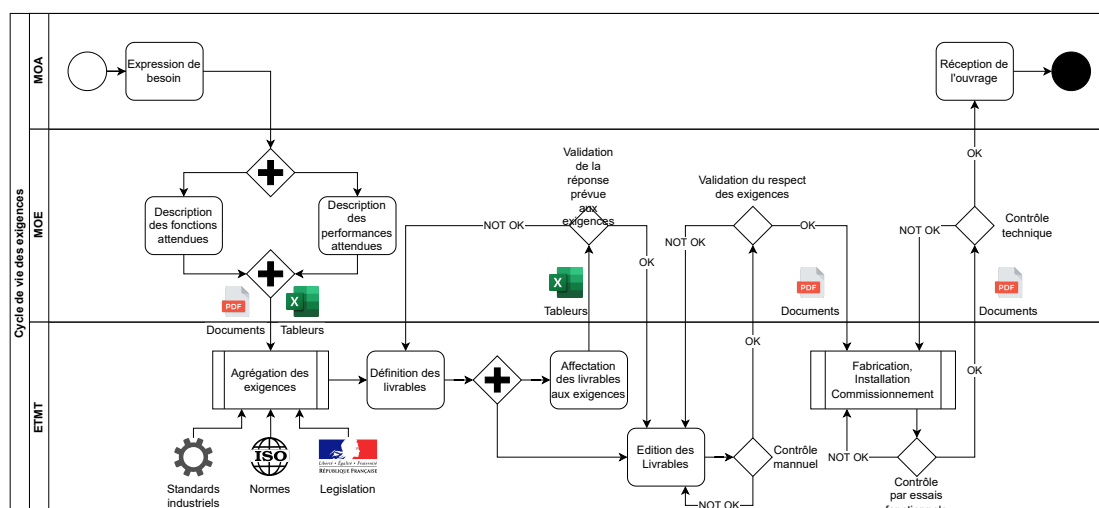


FIGURE 1 : Macro-processus de traitement des contraintes durant un projet de construction.

de systèmes complexes de détection d'incendies reliés avec les sapeurs pompiers locaux ou encore la réalisation d'un réseau de surveillance et de sécurité assujetti à des dispositions de résilience informatique.

La multiplicité des domaines assujetti à ce corps d'état (gestion des réseaux électriques) augmente la quantité de clauses contractuelles ainsi que le corpus normatif et législatif à prendre en charge par les entreprises. Chaque sous-domaine requiert généralement l'expertise d'un spécialiste intervenant souvent en fin de cycle de conception.

Hélas, cette intervention peut advenir trop tardivement : une infraction de contrainte critique peut nécessiter le renvoi du projet en amont de la phase de conception et entraîner des coûts et des retards exorbitants. Ces catastrophes financières pourraient être évitées en proposant aux acteurs impliqués en amont du projet des outils interactifs faciles d'utilisation leur permettant d'identifier et de pallier, par anticipation, les infractions aux contraintes électriques qu'ils seraient susceptibles de commettre lors de la phase de conception. Pour ce faire, il s'agirait de rendre tangibles le fonctionnement et les contraintes des différents flux électriques, leurs interférences avec les équipements environnants ainsi que les autres réseaux et leurs contraintes sécuritaires et normatives par des retours visuels et textuels adaptés, respectant des critères d'utilisabilité (au sens de la norme ISO 9241-11:2018), et de surcroît cohérents avec la démarche cognitive inhérente à la phase de conception. Il serait ainsi possible de garantir le respect de ces contraintes à chaque modification du projet ou à intervalles réguliers à la manière des tests unitaires dont la pratique a été systématisée dans l'industrie du génie logiciel.

3 Objet de la thèse

Cette thèse s'inscrit dans une démarche de réponse à des enjeux majeurs rencontrés par les entreprises du secteur de la construction⁶ et notamment définis par les normes :

- Management de la qualité (ISO 9001),
- Gestion des risques (X 50-117),
- Maîtrise des coûts (X 50-137),

- Maîtrise des délais (X 50-138),
- Capitalisation sur l'expérience (X 50-190).

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

3.1 Volet d'ordre applicatif

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

3.2 Volet lié à l'interaction humain-machine

Lorsqu'une contrainte est enfreinte, il est nécessaire de remonter à l'utilisateur non spécialiste la nature de l'infraction, sa ou ses causes et une ou plusieurs suggestions capables de lever l'infraction observée. Les solutions étudiées porteront sur les travaux liés à la conception d'Interfaces Utilisateur (UI),⁷ la prise en compte de critères de l'eXpérience Utilisateur (UX)⁸ et la réduction de la charge mentale de travail^{9,10} en situation d'interaction humain-machine. Parmi les approches étudiées, celle dite d'interface écologique fera l'objet d'une attention particulière.^{11,12} Le but de telles interfaces est de rendre perceptivement évidentes à l'utilisateur les contraintes et les relations complexes constitutives de l'environnement de travail.

3.3 Volet d'ordre méthodologique

Les outils ne sont pas neutres,¹³ ils permettent d'accompagner l'adoption de nouvelles méthodologies de travail. Les méthodes étudiées porteront notamment sur les pratiques agiles adoptées par l'industrie du génie logiciel et sur leur mise en place éventuelle dans le domaine de la construction. Nous étudierons en particulier comment la gestion itérative des modifications successives au projet (versioning) peut influencer l'organisation de la collaboration entre les différents acteurs d'un projet de construction.

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

4 Déroulement de la thèse

La thèse se situe dans un projet CIFRE réunissant deux partenaires : le LAMIH-UMR CNRS 8201/UPHF (via son département Informatique, thème "Interaction et agents") et EIFFAGE ENERGIE SYSTEMES qui a une forte compétence, au sein de la direction I2S, sur la conception et l'intégration de réseaux hétérogènes dans des projets d'ouvrages d'art et d'infrastructure.
Date de démarrage souhaitée : Au plus tôt en 2025

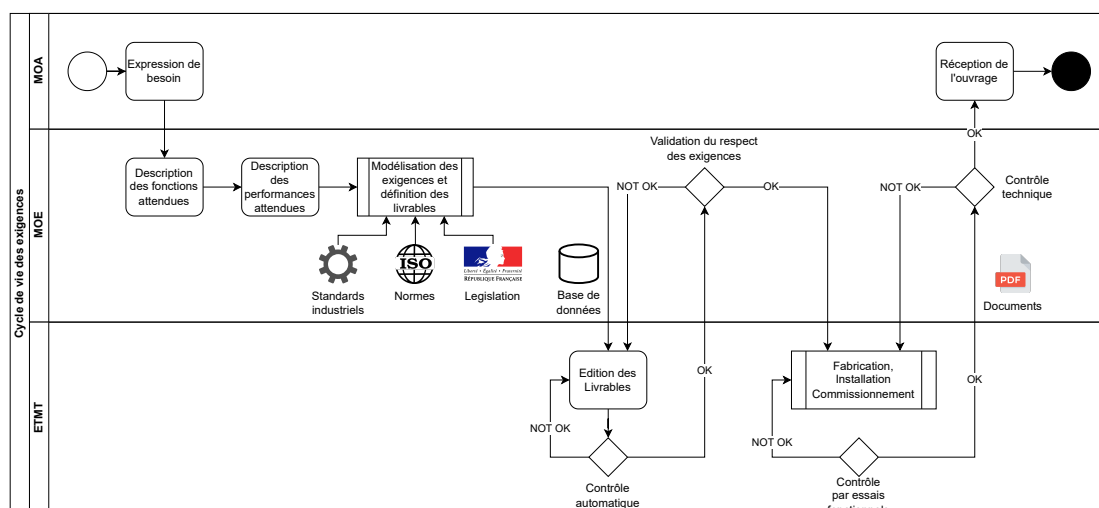


FIGURE 2 : Macro-processus de traitement des contraintes durant un projet de construction avec automatisation des vérifications d'études.

4.1 Phase 1 : Analyse de la problématique et étude bibliographique

La première phase de cette étude se concentre sur l'exploration des interfaces humain-machine (IHM), en mettant l'accent sur les approches permettant de contribuer à la sensibilité aux contraintes dans des espaces de solution (approches sensibles au contexte,¹⁴ interface écologique, visualisation...). Elle débutera par une revue de l'état de l'art visant à identifier les avancées récentes et les axes de recherche pertinents, tout en tenant compte des contraintes spécifiques rencontrées en entreprise. Une attention particulière sera accordée aux représentations intermédiaires utilisées dans ces interfaces, ainsi qu'à leur rôle dans la facilitation de la gestion d'espaces de solution.

4.2 Phase 2 : Proposition d'un modèle d'interface utilisateur sensible aux contraintes

Il s'agit d'en décrire les fondements et d'en proposer une architecture compatible avec les caractéristiques liées au domaine d'application.

4.3 Phase 3 : Élaboration d'un prototype et expérimentation initiale

Cette phase vise à concrétiser la proposition de modèle d'interface sensible aux contraintes par le développement et l'évaluation d'un prototype initial. Un protocole expérimental sera mis en place sur un périmètre restreint, permettant de valider les hypothèses formulées lors de la phase précédente. L'expérimentation s'appuiera sur des solutions "prêtes à l'emploi", optimisant ainsi le temps de développement. Un environnement d'étude contrôlé sera conçu, offrant un cadre d'expérimentation maîtrisé avec une documentation ciblée et un domaine d'étude circonscrit. Cette approche permettra une évaluation rigoureuse des concepts tout en maintenant une flexibilité suffisante pour les ajustements nécessaires. Des tests utilisateurs seront conduits en laboratoire fournissant des retours utiles pour l'itération du prototype.

4.4 Phase 4 : Déploiement et évaluation en contexte industriel

Cette phase vise à éprouver le prototype d'interface sensible aux contraintes dans un environnement industriel réel, offrant ainsi un cadre d'évaluation plus complexe et moins contrôlé. Le prototype sera intégré au réseau de contraintes de l'entreprise partenaire, permettant d'évaluer sa performance et son adaptabilité dans des conditions opérationnelles authentiques. Cette immersion en milieu professionnel exposera le système à des défis inédits, testant sa résilience face aux contraintes et aux imprévus inhérents au contexte industriel. Des tests utilisateurs approfondis seront menés auprès de professionnels du secteur, fournissant des retours d'expérience précieux et représentatifs des besoins réels. Cette phase permettra de recueillir des données empiriques robustes, essentielles pour valider la pertinence et l'efficacité du prototype dans des conditions d'utilisation réelles.

4.5 Phase 5 : Dissémination, valorisation et rédaction de la thèse

Une valorisation des travaux dans des conférences et journaux sera mise en place tout au long de la thèse. Les six derniers mois seront consacrés à la rédaction de la thèse et à la préparation de la soutenance. Eiffage Energie Systèmes assurera la dissémination des connaissances de la recherche dans l'industrie par l'organisation d'événements internes tels que des webinaires et par la création de MOOC sur sa plateforme Eiffage Université.

5 Localisation

La thèse sera effectuée principalement au sein de la société EIFFAGE ENERGIE SYSTEMES à Rennes, avec des séjours au sein du LAMIH-UMR CNRS 8201, situé à Valenciennes.

6 Planification

7 Modalités de suivi et d'échanges entre les partenaires

Ces modalités peuvent être vues selon plusieurs niveaux.

Pour le suivi en continu de la thèse, des échanges, qui pourront aussi bien être synchrones qu'asynchrones (visio, courriel, WhatsApp...) se feront selon les besoins de l'activité en cours, si besoin chaque semaine, entre le doctorant (Cyprien Pierre) et les co-superviseurs côté laboratoire (Alexis Héloir et Christophe Kolski). En outre il est prévu que le doctorant passe 3 mois par an au LAMIH. Ces périodes dépendront des objectifs : réunions, formations, participation à des séminaires, campagne de tests utilisateur, etc.). Concernant les formations, 40 crédits doivent être obtenus durant la durée de la thèse, en se conformant à l'arrêté du 26 août 2022 modifiant l'arrêté du 25 mai 2016. Les modalités de formation sont visibles à : <https://www.uphf.fr/recherche/lecole-doctorale/formations-doctorales/formations-doctorales>. Des réunions trimestrielles seront organisées, réunissant les deux partenaires : le doctorant, les co-superviseurs côté laboratoire et Mathieu Chapel, qui est le superviseur du doctorant au sein de l'entreprise. Selon les thèmes abordés dans chaque réunion, d'autres membres du laboratoire et de l'entreprise pourront être invités.

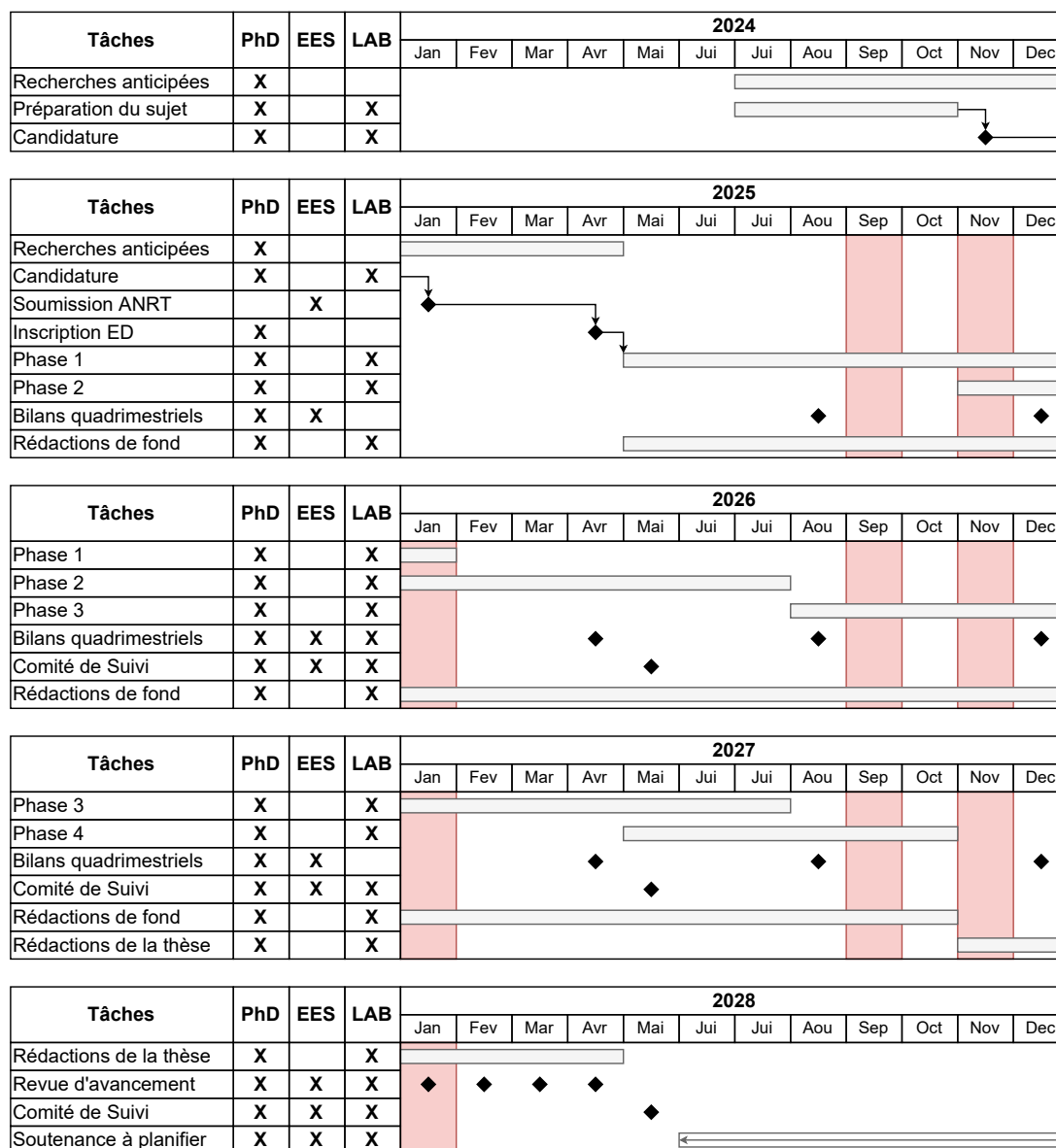


FIGURE 3 : Macro-processus de traitement des contraintes durant un projet de construction avec automatisation des vérifications d'études.

L'évaluation de l'avancement respectera le processus basé sur un Comité de Suivi Individuel (CSI), tel que proposé par l'école doctorale et pratiqué au LAMIH. L'avancement est évalué par le comité à la fin de chaque année de thèse. Les superviseurs (côté laboratoire et côté entreprise) sont invités à participer à ce comité. En outre, le règlement intérieur de l'ED sera respecté, en vue de l'organisation de la soutenance. Le règlement intérieur de l'école doctorale est disponible à : <https://www.uphf.fr/recherche/lecole-doctorale/reglement-interieur>

8 Moyens et matériels mis à disposition

- **Côté laboratoire** : un Maître de Conférences en Informatique, co-encadrant de la thèse et un Professeur des Universités de Classe exceptionnelle 2 seront les co-superviseurs de la thèse.
- **Côté entreprise** : Mise à disposition d'un réseau de professionnels experts, mise à disposition des corpus documentaires caractéristiques du domaine d'étude, prise en charge des frais de plateformes et d'infrastructures numériques nécessaires ainsi que de la fourniture du matériel adapté aux travaux du doctorant.

9 Retombées attendues

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

10 Co-superviseurs de la thèse au LAMIH-UMR CNRS 8201

- **Alexis Heloir**, Maître de Conférences en Informatique, co-encadrant de la thèse : <mailto:alexis.heloir@uphf.fr>
- **Christophe Kolski**, Professeur en Informatique, directeur de la thèse : <mailto:Christophe.Kolski@uphf.fr>

11 Superviseur de la thèse côté EIFFAGE ENERGIE SYSTEMES

- **Mathieu Chapel**, Responsable de projet : <mailto:Mathieu.Chapel@eiffage.com>

12 Références

1. DEL SAVIO, Alexandre Almeida; VIDAL QUINCOT, José Francisco; BAZÁN MONTALTO, Alvaro Daniel; RISCHMOLLER DELGADO, Leonardo Antonio; FISCHER, Martin. Virtual Design and Construction (VDC) Framework: A Current Review, Update and Discussion. *Appl. Sci.* [en ligne]. 2022, vol. 12, no. 23, p. 12178 [visité le 2025-06-29]. ISSN 2076-3417. Disp.   l'adr. doi: 10 . 3390/app122312178. Place du BIM dans le VDC.
2. MOHAMED ADEL; ZHUO CHENG; ZHEN LEI. Integration of Building Information Modeling (BIM) and Virtual Design and Construction (VDC) with Stick-Built Construction to Implement Digital Construction: A Canadian General Contractor's Perspective. *Buildings* [en ligne]. 2022, vol. 12, no. 9, p. 1337–1337 [visit  le 2025-01-22]. ISSN 2075-5309. Disp.   l'adr. doi: 10 . 3390/buildings12091337.
3. 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.   l'adr. doi: 10 . 1016/S2212-5671(15)00165-3.
4. 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.   l'adr. doi: 10 . 3406/homso . 1973 . 1831.
5. ARTO KIVINIEMI; MARTIN FISCHER; VLADIMIR BAZJANAC; BOYD PAULSON. *PREMISS - Requirements Management Interface to Building Product Models: Problem Definition and Research Issues*. 2004-10. Working Paper, WP092. Stanford University. Aussi disponible   l'adresse: <https://purl.stanford.edu/ds532qd2802>.
6. GUILLOU, Maurice; RESPIN-MAZET, Florence; SALLE, Robert. La Segmentation Dans Les Entreprises Travaillant Par Affaires : L'exemple de Spie Batignolles Dans Le Secteur Du BTP : *Décisions Marketing* [en ligne]. 2003, t. N  31, n  3, p. 63-71 [visité le 2025-07-03]. ISSN 0779-7389. Disp.   l'adr. doi: 10 . 3917/dm . 031 . 0063.
7. SHNEIDERMAN, Ben; PLAISANT, Catherine; COHEN, Maxine; JACOBS, Steven; ELMQVIST, Niklas. *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction*. Sixth edition. London: Pearson, 2016. Always Learning. ISBN 978-0-13-438038-4.
8. NOGIER, Jean-François. *UX design et ergonomie des interfaces, 7 me édition*. 7e  d. Paris : Dunod, 2020. ISBN 978-2-10-080696-6.
9. LONGO, Luca; WICKENS, Christopher D.; HANCOCK, Gabriella; HANCOCK, P. A. Human Mental Workload: A Survey and a Novel Inclusive Definition. *Front. Psychol.* [en ligne]. 2022, vol. 13, p. 883321 [visit  le 2025-06-29]. ISSN 1664-1078. Disp.   l'adr. doi: 10 . 3389/fpsyg . 2022 . 883321.
10. MORAY, Neville. *Mental Workload: Its Theory and Measurement* [en ligne]. 1st ed. Boston: Springer, 1979 [visit  le 2025-06-29]. ISBN 978-1-4757-0886-8 978-1-4757-0884-4. Disp.   l'adr. doi: 10 . 1007/978-1-4757-0884-4.
11. VICENTE, Kim J.; RASMUSSEN, Jens. Ecological Interface Design: Theoretical Foundations. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.* [en ligne]. 1992, vol. 22, no. 4, p. 589–606 [visit  le 2025-06-29]. ISSN 00189472. Disp.   l'adr. doi: 10 . 1109/21 . 156574.

12. BURNS, Catherine M.; HAJDUKIEWICZ, John. *Ecological Interface Design*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004. ISBN 978-0-367-39414-1.
13. BORREMANS, Valentina. *Guide to Convivial Tools*. New York, N.Y: Library Journal, 1979. LJ Special Report, no. 13. ISBN 978-0-8352-1269-4.
14. ANIND K. DEY; GERD KORTUEM; DAVID R. MORSE; ALBRECHT SCHMIDT. Situated Interaction and Context-Aware Computing. *Personal and Ubiquitous Computing*. 2001, vol. 5, p. 1-3. Disp. à l'adr. DOI: 10.1007/PL000000013.

13 Acronyms

BIM	1, 2, 4
VDC	1, 1