



HAL
open science

De la mécatronique de conception vers la mécatronique de construction : à la recherche d'une genèse pour la conception de la robotique sur chantier

Thomas Zedin

► To cite this version:

Thomas Zedin. De la mécatronique de conception vers la mécatronique de construction : à la recherche d'une genèse pour la conception de la robotique sur chantier. Architecture, aménagement de l'espace. HESAM Université, 2020. Français. NNT : 2020HESAC003 . tel-02612231

HAL Id: tel-02612231

<https://theses.hal.science/tel-02612231v1>

Submitted on 19 May 2020

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.

ÉCOLE DOCTORALE ABBÉ GRÉGOIRE
UMR Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine
Laboratoire de Modélisations pour l'Assistance à l'Activité Cognitive de la Conception

THÈSE

présentée par : **Thomas ZEDIN**

soutenue le : **29 janvier 2020**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**
préparée au : **Conservatoire national des arts et métiers**

en partenariat avec : **École nationale supérieure d'architecture de Paris – La Villette**

Discipline : **Aménagement de l'espace, urbanisme**
Spécialité : **Architecture, Urbanisme et Environnement**

De la mécatronique de conception vers la mécatronique de construction :

**A la recherche d'une genèse pour la conception de la robotique
sur chantier**

THÈSE dirigée par :

GUENA François Professeur des Écoles d'Architecture, ENSA de Paris - La Villette

Jury

M. Benoît FURET , Professeur des universités, Université de Nantes	Président / Rapporteur
M. Pascal TERRACOL , HDR, Maitre de conférences des écoles d'architecture, ENSA Paris Val de Seine	Rapporteur
Mme Eglantine BIGOT-DOLL , Maitre de conférences des écoles d'architecture, ENSA Lyon	Examineur
Mme Antonella MASTRORILLI , Professeur des écoles d'architecture, ENSAP Lille	Examineur

Remerciements

Je tiens à remercier...

Mon directeur de thèse, François Guéna, qui m'a laissé la liberté de faire cette thèse sans me contraindre au moindre dogme pour offrir, je l'espère, une contribution singulière à la recherche en architecture.

Les membres du laboratoire MAACC qui m'ont soutenu et permis de garder un regard scientifique sur des phénomènes complexifiés par les méthodes de la recherche-action.

L'UMR MAP qui m'a permis de prendre la mesure de l'importance de la recherche entre numérique et architecture.

Les membres du plateau de recherche de l'ENSAPLV traitant parfois des mêmes objets mais avec un regard différent de par les disciplines auxquelles ils se réfèrent.

Les pères des sciences de la conception qui ont su, à travers leurs productions scientifiques, transformer la manière dont l'architecte praticien que j'étais comprenait la conception. Et Thomas Bock pour son travail précurseur et toujours vivant sur la robotique de construction

Cette recherche n'aurait pu se faire sans la participation du monde professionnel qui m'a ouvert ses portes.

Pascal Mazé qui m'a fait confiance et m'a donné de multiples opportunités de présenter mon projet de recherche à nombre de décideurs en bureau d'études, cabinets d'architectes et entreprises de construction.

L'entreprise PETIT et tout d'abord Manuel Estèves, qui de sa position de directeur a su m'écouter et me donner un mandat pour contribuer à la transformation des entreprises de construction. Philippe Vancapernolle qui, malgré ses interrogations, a pris le temps de comprendre ce projet. Olivier Marchand qui m'a supervisé et donné les moyens de réaliser nombre d'actions permettant les conditions d'observation essentielles à cette recherche.

Le groupe Vinci avec lequel je travaille encore à diffuser une culture R&D dans sa filière réhabilitation.

Jeremy Lepoittevin et François Thibert de l'entreprise Segula Matra pour leur expertise et leur participation aux projets de robotique les plus ambitieux.

Mes collègues, très nombreux. Je vais forcément oublier des noms, mais je tiens à citer Olivier Fuzeau, Thomas Pereira, Clément Foullon, Clément Mourens, Ludovic De Vaumas, Manel Khelifa, Gregory Jaquet, Matthieu Broncel, Julien Ischer, Franck Percet. Ils ont contribué à faire de cette recherche un objet ancré dans le réel en comprenant le grand écart que je devais faire pour lier activité de recherche et besoins opérationnels.

Ma famille et mes amis...

Enfin je remercie tous ceux qui liront ce mémoire. J'espère que ce travail inspirera d'autres recherches, notamment pour faire évoluer la construction.

Résumé

Il s'agit d'une recherche en architecture portant sur l'intégration de la mécatronique dans la conception des chantiers de construction. La mécatronique est une démarche de conception par combinaison des techniques électroniques informatiques et mécaniques. On retrouve la mécatronique dans des objets du quotidien, mais surtout comme outil de production dans l'industrie avec la robotique. La recherche sur la « mécatronique de construction » existe depuis les années 70 à l'initiative du secteur de la construction au Japon. En architecture la « mécatronique de conception » a permis l'émergence de nouvelles pratiques autour de la fabrication. Celles-ci sont apparues dans les années 2000, grâce à l'accès aux machines à commandes numériques et aux microcontrôleurs dans le milieu académique.

Ces objets de recherche et ces nouvelles pratiques sont difficilement observables dans l'industrie de la construction. La mécatronique semble relativement absente des chantiers et la robotique de construction ne fait pas encore partie des catalogues d'engins de construction. La mécatronique de conception ne fait pas encore partie des outils des bureaux d'études. Nous avons donc cherché à connaître les processus de conception des systèmes mécatroniques pour la construction. Pour cela nous avons confronté la mécatronique aux processus de conception des chantiers d'une entreprise générale de construction.

Nous avons réalisé une série d'expériences sous forme de cas d'étude en observation participante. Ces cas d'étude concernent la production de concepts de mécatronique de construction associés à la mise au point des chantiers. Nous avons mobilisé les acteurs de la conception des chantiers (bureaux d'étude, services d'ingénierie technique, conducteurs de travaux) pour travailler sur différents aspects de la mécatronique adaptée à leurs métiers.

Cette connaissance de la conception doit nécessairement s'appuyer sur un socle scientifique. L'architecture n'étant pas une discipline scientifique, nous nous sommes appuyés sur des théories de la conception telles que l'Architecturologie développée au sein du laboratoire MAACC. Celles-ci nous ont servi de grille de lecture pour nos observations et de support pour proposer des méthodes de conception de la mécatronique de construction.

Mots clefs : Conception ; Construction ; Architecture ; Robotique ; Mécatronique ; Automatisation ; Architecturologie ; Théorie C-K

Abstract

This research is developed in the field of architecture. It aims at studying the development of mechatronics in construction design and especially building sites. Mechatronics is a design process combining mechanics, electronics and informatics. It can be found in a lot of manufactured products, and is used in industry for production with the growth of robotics. The research in "Construction mechatronics" began in the early 70's in Japan. Later, the rise of rapid prototyping created new practices in architecture for "Design mechatronics". It appeared in the early 2000's thanks to the spread of CNC machining and microcontrollers in academic environments.

These new practices and research fields are hardly observable in the construction industry. Mechatronics seems to be missing on building sites and not accessible. Also, Design mechatronics is not present in every design and technical departments. Thus, we focused on producing knowledges about the design processes attached to the integration of mechatronics in construction field. We did it by confronting this integration with a regular construction company activities.

This led us to a series of experiments by case study in action-research. These cases are focussing on the concepts production for construction robotics. It involved multiple actors charged to the organisation and design of building sites. We looked at their reasoning to match mechatronics with their crafts and occupations.

These studies had to be bound to scientific foundations. Architecture is not a scientific discipline, but can be related to Design sciences such as Architecturology developed in the MAACC laboratory. Design sciences helped us to analyse these observations and constitute design methods to design construction mechatronics systems.

Key words: Design; Construction; Architecture; Robotics; Mechatronics; Automation; Architecturology; C-K Theory

Table des matières

REMERCIEMENTS	1
RESUME	2
ABSTRACT	3
TABLE DES MATIERES	4
LISTE DES FIGURES.....	10
INTRODUCTION.....	17
PARTIE 1. MECATRONIQUE ET ARCHITECTURE : INNOVATION DE LA CONSTRUCTION OU INNOVATION DE LA CONCEPTION ?	19
CHAPITRE 1. MECATRONIQUE DE CONSTRUCTION : UNE TENDANCE DE L'INNOVATION EN ARCHITECTURE ?	21
1. L'émergence de la mécatronique dans la pratique architecturale.....	21
2. L'absence de mécatronique dans les procédés constructifs	22
3. Les besoins de générer de l'innovation et de la maîtriser	22
4. Initier une pratique et une pensée de la mécatronique sur les chantiers.....	23
5. Synthèse.....	24
CHAPITRE 2. L'OBJET DE LA RECHERCHE : CONNAITRE LES PROCESSUS DE CONCEPTION DE LA MECATRONIQUE POUR INNOVER DANS LA CONSTRUCTION.....	25
1. Ancrage scientifique.....	25
1.1. Introduction	25
1.2. Sciences de la conception pour l'architecture	26
1.3. Conception architecturale numérique	27
1.4. Conception architecturale et patrimoine.....	27
1.5. Architecture et éco-conception	28
1.6. Fabrication numérique et la conception : Un nouveau champ de recherche	28
2. Problématique :	29
2.1. Quels outils peuvent être supports de la conception de la mécatronique pour les chantiers ?	29
2.2. Comment conduire un projet de conception de robot de construction ?.....	30
2.3. Comment modéliser la conception de la mécatronique de construction ?.....	30

3.	Synthèse.....	31
CHAPITRE 3. ETAT DES CONNAISSANCES : CONTEXTE DE LA MECATRONIQUE EN ARCHITECTURE 33		
1.	La mécatronique et la robotique	33
1.1.	La mécatronique : origines et définition	33
1.2.	Un vecteur du développement de l'informatique et de la robotique.	35
1.3.	Définition par des exemples.....	35
1.4.	Lorsque la mécatronique se rapproche du champ de l'architecture.....	36
1.5.	Intégrateur en robotique – Maître d'œuvre de la mécatronique ?.....	37
1.6.	Réduire la définition de la mécatronique à des fondamentaux	38
2.	Mécatronique en architecture : Théorie, pratique et recherche.	38
2.1.	Le fantasme de la robotique	38
2.2.	L'architecture en mouvement.....	41
2.3.	L'architecte qui construit : l'idée d'un continuum numérique	42
2.4.	La fabrication additive pour concevoir et construire.....	44
2.5.	Mécatronique de conception : Un concept pour nommer ces pratiques.....	49
3.	La mécatronique de construction.....	49
3.1.	Origines de la mécatronique de construction.....	49
3.2.	Un domaine de recherche international et interdisciplinaire.....	50
3.3.	La robotique de construction en France	50
3.4.	La mécatronique de construction à travers ses applications.....	55
4.	Synthèse.....	77
CHAPITRE 4. CONNAISSANCES DE LA CONCEPTION POUR LA MAITRISE DES OBJETS TECHNIQUES 79		
1.	Des règles de conception pour la mécatronique de construction.....	79
1.1.	Premières approches : conception de la robotique pour l'architecture ou conception de l'architecture pour la robotique ?.....	79
1.2.	Robot Oriented Design : Une synthèse des connaissances sur la conception de la robotique de construction.	80
2.	Théories de la conception.....	82
2.1.	Définir la conception	82
2.2.	L'Architecturologie.....	83
2.2.1	Constitution de l'Architecturologie :.....	83
2.2.2	Des applications pour l'aide à la conception et le développement de son instrumentation.	87

2.3.	La théorie C-K	89
2.3.1	Constitution de la théorie C-K.....	89
2.3.2	Des applications dans l'aide à la conception pour l'innovation	90
3.	Synthèse.....	91
PARTIE 2. METHODE DE RECHERCHE : CONCEVOIR POUR COMPRENDRE LA CONCEPTION		93
CHAPITRE 1. DES DOMAINES A EXPLORER, UN TERRAIN A CONSTRUIRE.		95
1.	Retour sur la problématique.....	95
2.	Concevoir la mécatronique de construction en entreprise générale.....	96
2.1.	Contexte de l'entreprise.....	97
2.2.	Activités et organisation de l'entreprise	97
2.2.1	Les études de prix : conception par l'estimation de la construction.....	98
2.2.2	Les services travaux : concepteurs des modes de production	98
2.2.3	Services d'ingénierie technique et services supports : spécialisations de la conception.	98
2.3.	Une entreprise tournée vers l'innovation.....	99
2.4.	Chargé d'étude R&D en entreprise générale	100
3.	Synthèse.....	101
CHAPITRE 2. CONCEPTION ET RECHERCHE : GESTION DES ENJEUX EPISTEMOLOGIQUES.....		103
1.	Introduction	103
2.	Etude de la recherche-action.....	104
2.1.	Recherche projet et recherche création	105
2.2.	Recherche finalisée	107
2.3.	Recherche appliquée ou impliquée ?.....	107
2.4.	Des méthodes pour les sciences de gestion.	108
2.4.1	La recherche intervention.....	108
2.4.2	L'observation participante.....	109
2.4.3	L'Etude de cas	109
3.	Vers une méthode de recherche projet entre l'étude de cas et l'observation participante.	110
4.	Synthèse.....	111
CHAPITRE 3. PROTOCOLES EXPERIMENTAUX		113
1.	Principes généraux : Exploration et analyse d'une pratique	113

1.1.	Constitution de cas pour l'observation de la mécatronique de conception et de construction	114
1.2.	Utilisation des sciences de la conception comme prisme d'analyse	114
1.3.	Résumé de la méthodologie	115
2.	Description des expérimentations.....	116
2.1.	Mécatronique de conception et génération de concepts pour la fabrication.....	116
2.2.	Les phénomènes de conception associés à la mécatronique de construction.....	117
2.3.	Modélisation des processus de conception et proposition de méthodes de gestion	118
3.	Synthèse.....	120
PARTIE 3. INTRODUCTION DE LA MECATRONIQUE DANS LA CONCEPTION DU CHANTIER		121
CHAPITRE 1. MECATRONIQUE DE CONCEPTION : UN SUPPORT PERTINENT POUR LA GENERATION DE CONCEPTS DE ROBOTIQUE DE CONSTRUCTION ?		123
1.	Introduction	123
2.	Les machines à commande numériques en étude de projet.....	123
2.1.	Le choix d'une machine.....	124
2.1.1	Revue d'inventaire et projections sur l'usage.	125
2.1.2	Evaluer pour décider : perception, calcul, modélisation.	128
2.2.	Les cas d'applications observés.....	134
2.2.1	Expliquer et justifier un phasage de chantier	134
2.2.2	Figurer un processus de conception – Envisager sa construction	136
2.2.3	Proposer des variantes de conception - Comparer et évaluer	137
2.2.4	Faciliter la simulation – Se libérer du numérique.....	139
3.	Microcontrôleurs et prototypage de robots de construction	141
3.1.	Phases d'explorations : des bases de la mécatronique aux systèmes plus complexes	142
3.1.1	Montage de machines à commandes numériques.....	142
3.1.2	Montage et programmation d'un robot anthropomorphe	143
3.1.3	Montage et programmation d'un robot mobile	145
3.1.4	Conception de systèmes de coffrage automatisés.....	146
3.2.	Mécatronique de conception et acteurs de la construction.....	151
3.2.1	La construction de l'atelier/expérimentation :.....	151
3.2.2	Tendances générales de représentation et de projets	152

4. Synthèse.....	159
CHAPITRE 2. PROJETS DE ROBOTIQUE DE CONSTRUCTION : CONVERGENCE ENTRE CONCEPTS MECATRONIQUES ET PROBLEMATIQUES DE CHANTIERS.....	
1. Introduction	161
2. L'approche technologique comme moyen de conception	161
2.1. Des impacts sur les raisonnements de conception.....	161
2.1.1 Projets de R&D et approche descendante.....	161
2.1.2 Déterminer des objectifs : Les indicateurs et influences majeures.....	162
2.2. Exemples de montage de projets de R&D pour la robotique de construction.....	163
2.2.1 Projets COSITROS et ROSCOF : De la robotique mobile au chantier	163
2.2.2 Des concepts de robotique de construction et leurs verrous technologiques.....	173
3. La robotique de construction initiées par les chantiers	175
3.1. Les impacts sur le raisonnement de conception.....	175
3.1.1 Un problème ne vient jamais seul	175
3.1.2 Disparition de l'évidence d'une solution mécatronique.....	176
3.2. Exemples d'intrication de concepts et de problèmes pour la robotique de construction	176
3.2.1 Dépose de pavés de verres : Contrôle de la sécurité des modes opératoires.....	176
3.2.2 Fabrication d'une résille monumentale : la complexité des formes gérée par des robots ?	178
3.2.3 Coffrage glissant en réhabilitation : reproduire l'automatisation des chaînes de production sans l'économie d'échelle ?	179
3.2.4 Pose de menuiseries métalliques par l'intérieur : réduire l'impact des installations de chantier	179
3.2.5 Automatisation d'une table coffrante : Gestion locale d'un positionnement géométrique dynamique.	180
3.2.6 Le robot de percement : Réduire la pénibilité.....	181
4. Synthèse.....	185
CHAPITRE 3. VERS DES METHODES INSPIREES DES SCIENCES DE LA CONCEPTION.	
1. Architecturologie – le continuum numérique par la mesure de l'architecte.	187
1.1. Mesure et mécatronique de construction	188
1.2. Regard croisé entre Architecture et Mécatronique.....	189
1.3. Vers une production de concepts basés sur la mesure	190
2. Théorie C-K – Modéliser pour analyser et modéliser pour concevoir.	192

2.1.	La génération du concept.....	192
2.2.	Un processus de conception infini	194
2.3.	Prototypage à la frontière entre connaissances et concept.	198
3.	Synthèse.....	202
CONCLUSION GENERALE.....		203
BIBLIOGRAPHIE		205

Liste des figures

Figure 1 Diagramme d'Ingénierie Mécatronique (Wikipedia, 2008).....	34
Figure 2 Aerial Euler diagram d'après Rensselaer Polytechnic Institute (Wikipedia, 2012)	35
Figure 3 Exemple de familles de robots	36
Figure 4 Exemple de plateformes de prototypage de familles de robots.....	36
Figure 5 Critères de « meilleur » recouvrement d'un espace visé Vv (Chedmail, Dombre, & Wenger, 1998).....	37
Figure 6 Comportement du robot HILARE dans un problème de navigation (Chatila, Laumond, & Prajoux, 1987).....	37
Figure 7 Archigram, Walking City (Project 064), 1964. Image © Deutsches Architekturmuseum	39
Figure 8 Concept de fermes verticales robotisées urbaines - Boston Höweler + Yoon (Housley, 2009)	40
Figure 9 Olzweg, François Roche/Stéphanie Lavaux/Jean Navarro, 2006, Paris et Frac Orléans	40
Figure 10 Architectonic control system diagram, 2009 (Meyboom et al., 2010)	41
Figure 11 reCHARGE lamp – movable lamp post prototype. Par Paulina Kowalczyk, Ewa Szylb- erg, Krystian Kwiecinski, Radek Stach, Maciek Turski(Pasternak, 2012).	42
Figure 12 City Carpet project – roof structure prototype. Par Paulina Kowalczyk, Ewa Szylb- erg, Krystian Kwiecinski, Radek Stach, Maciek Turski(Pasternak, 2012).	42
Figure 13 Exemples de maçonneries assemblées par des robots ; (g) Gantenbein Vineyard Facade, Fläsch, Suisse, 2006; (d) Structural Oscillations, Venise, 2007-2008, auteurs : Gramazio et Kohler (Gramazio & Kohler, 2015)	43
Figure 14 Exemples de systèmes d'assemblages de maçonneries robotisés ; (g) Stratification , UCL Bartlett, 2011 ; (d) Flight assembled Architecture, Frac d'Orlean, 2011, auteurs : Gramazio et Kohler (Brell-Cokcan & Braumann, 2013).....	43
Figure 15 . Fisac Variations. (g): prototypes for the production of beams in EPS and concrete. (d) parametric model to study the configuration of beams on a surface. Credits: Felix Raspall, Matías Imbern et Will Choi (Raspall, 2015).	44
Figure 16 ICD/ITKE Research Pavilion, Université de Stuttgart 2012 (Knippers & Menges, 2014)	44
Figure 17 D-Shape- premières réalisations – 2004	45
Figure 18 Projet Landscape House présenté lors d'Europas 2012	45
Figure 19 - Image de synthèse représentant un abri lunaire construit par fabrication additive (Foster + Partners, 2013)	46
Figure 20 Proposition de système de fabrication additive lunaire par l'ESA (Foster + Partners, 2013)	46
Figure 21 L'habitat imprimé - François Brument – 2013 / Imprimante VoxelJet.....	47

Figure 22 Imprimante 3D plastique sur mesure / Printed canal house - DUS – 2013.....	47
Figure 23 Réalisation de logements sociaux dans le cadre du projet BATIPRIN 3D (Furet, Poullain, & Garnier, 2019).....	48
Figure 24 Projet d'impression d'un pont métallique - MX3D - 2014 – Amsterdam.....	48
Figure 25 Les robots japonais. Extrait du journal d'entreprise InterDumez, Section Qualité Innovation, 1993.....	50
Figure 26 Liste des projets de robotique de construction référencés par le CSTB en 1990 (Hasegawa, 1991).....	51
Figure 27 Dispositif expérimental SOFFITO en 1988(Salagnac, Gallais, & Chevalaz, 1988)	52
Figure 28 Dispositif expérimental SOFFITO en 1989 (Salagnac, 1989)	52
Figure 29 Vue du dispositif expérimental SOFFITO en 1990 (Salagnac, Vinot, & Pujol, 1990)	52
Figure 30 Principe de fonctionnement de SOFFITO en 1988 (Salagnac et al., 1988).....	53
Figure 31 Principe de fonctionnement de SOFFITO en 1989 (Salagnac, 1989).....	53
Figure 32 Principe de fonctionnement SOFFITO en 1990 (Salagnac et al., 1990).....	53
Figure 33 Extrait de CSTB magazine (Salagnac & Peyret, 1993).....	54
Figure 34 Demolition units: BROKK – Holmhed systems AB.....	55
Figure 35 Concrete Hydrodemolition Robot – WOMA Apparatebau GMBH.....	56
Figure 36 Conjet Jetframe system for hydrodemolition – Conjet AB	56
Figure 37 Conjet Jetframe system for hydrodemolition – Conjet AB - adaptations	57
Figure 38 Water-Jet Chipping Robot – Kumagai Gumi.....	57
Figure 39 Digging Work Robot - Tokyu Construction – 1989.....	58
Figure 40 Unmanned Caisson Method– Kajima corporation 1-2.....	59
Figure 41 Unmanned Caisson Method– Kajima corporation 2-2.....	59
Figure 42 Road Profile Cutter Er501F – Sakai Heavy Industries, ltd.....	60
Figure 43 Road Robot – Fully Automatic Road Paver – Joseph Vögele AG	60
Figure 44 Stabilator Tunnel Lining Repair system – Stabilator AB	61
Figure 45 Tunnel Swift Lining Robot – Tekken Corp.....	61
Figure 46 Multi-jointed Arm Erector – Kawasaki Heavy Industries	62
Figure 47 Computer Controlled Mobile Concrete Distributor – Putzmeister	63
Figure 48 Simplified Distributor DB ROBO – Tanekaka	63
Figure 49 Automatic Concrete distribution system with Tower Crane – Konoike construction – 1989	64
Figure 50 Toboshima Auto-level Pantograph Slipform – Tobishima corp -1987	64

Figure 51 Concrete Floor Screeding Robot– Takenaka corp	65
Figure 52 Concrete-slab Finishing Robot– Kajima corp.....	66
Figure 53 Floor troweling Robot– Hazama corp	66
Figure 54 Material-Handling System for interior Finishes – Shimuzu corp, Mistubishi Heavy Industries	67
Figure 55 K A L C A T T A – LM15-1 – Komatsu ltd	68
Figure 56 Light Weight Manipulator – Tokyu Construction CO	68
Figure 57 Autonomous truck system– Komatsu Ltd	69
Figure 58 Column Welding Robot– shimizu corp, Mistubishi Heavy Industry	70
Figure 59 Plumb Navi– Toda corp	71
Figure 60 T-UP Buiding Construction Method– Taisei corp – 1992	71
Figure 61 Robot for Painting Exterior Wall – Taisei corp – 1988	72
Figure 62 Fire-resisting Rock Wool Spraying Robot – Toda corp, Nozawa corp	72
Figure 63 Exterior-Wall Painting Robot – Kajima corp.....	73
Figure 64 Vacuum and self-travelling system Polishing and Painting robot – Urakami.....	73
Figure 65 Exterior wall tile inspection robot – Taisei corp.....	74
Figure 66 Underwater inspection robot –Toshiba corp	75
Figure 67 Automatic cleaning system for the under carriage – Komatsu	75
Figure 68 Automated construction system for reinforce concrete building – Obayashi corp – 1995..	76
Figure 69 SMART system – Shimizu corp – 1991	76
Figure 70 Robot oriented design of variable building kits (Bock, 1988b)	80
Figure 71 Design for automated construction (Gatton & Boyer, 1988).....	80
Figure 72 Les différentes échelles architecturologiques qui composent le langage de l’Architecturologie fondamentale (Boudon et al., 1994)	86
Figure 73 Synthèse des éléments constitutifs du processus de la conception modélisés par l’Architecturologie (Ben Rajeb, 2012).....	86
Figure 74 Carte d’identité architecturologique de l’éco-conception (Lecourtois, 2013).....	88
Figure 75 Méthode de traitement et d’analyse des données pour la conception collaborative distante instrumentée (Ben Rajeb, 2012).....	88
Figure 76. Le "Design square" de la théorie C-K (Hatchuel & Weil, 2003)	89
Figure 77.La dynamique de conception C-K.....	90

Figure 78. Innovative project evaluation: contrasting product development and innovative design (Hatchuel et al., 2016).	90
Figure 79 Exemples de productions faites au cours de la recherche sur la conception de la mécatronique pour la construction.....	100
Figure 80 Représentation de la démarche de recherche en début de thèse.....	103
Figure 81 Inventaire de notions liées à la recherche-action	104
Figure 82 Le modèle méthodologique et opérationnel de la recherche-projet (Findeli, 2015)	105
Figure 83 Le modèle dit « de Brême » ou de « l'éclipse de l'objet », exposant une théorie générale du projet (Findeli, 2015)	106
Figure 84 Le modèle de Brême avec les deux volets du projet de design.(Findeli, 2015)	106
Figure 85 Méthode de recherche : conception/observation/analyse	115
Figure 86 Machine de découpe au fil chaud (G) Exemple de réalisations (D)	125
Figure 87 Machine de découpe laser(G) Exemple de réalisations (D)	126
Figure 88 Fraiseuse numérique(D) Exemple de réalisations (G)	127
Figure 89 Imprimantes 3D par dépôt de fil	127
Figure 90 Imprimante 3D par fixation de poudre(G) Exemple de réalisations(D)	128
Figure 91 Représentation du taux d'imprécision d'impressions 3D selon l'échèle des modèles et la capacité de la machine	130
Figure 92 Modélisations des procédés de production de formes des machines à commandes numériques. Fraisage(G), Concrétion(M), Fixation(D) – Extrait vidéo.	131
Figure 93 Interfaces nécessaires au passage du BIM vers l'impression 3D	132
Figure 94 Représentations des processus de travail observés sur une maquette BIM en phase appel d'offre	133
Figure 95 Modèle numérique préparé pour l'impression.....	135
Figure 96 Maquette partielle de structure mixte sur dalle – Echelle 1/100	135
Figure 97 Maquette d'un détail de fixation - Echelle 1/1.....	136
Figure 98 Maquette de l'escalier - Echelle 1/25.....	137
Figure 99 Documents de présentation de la variante.....	138
Figure 100 Modèles pour impression.....	138
Figure 101 Maquette détail de couverture - Echelle 1/20.....	139
Figure 102 Modèles de test.....	140
Figure 103 Cinématique de pose par le niveau haut	140
Figure 104 Cinématique de pose par le niveau bas	141

Figure 105 Montages de machines à commandes numériques /Fraiseuse numérique (G) et imprimante 3D (D).....	142
Figure 106 Montage initial d'un robot anthropomorphe 6 axes	143
Figure 107 Système final avec son interface de commande.....	144
Figure 108 Systèmes mobiles de mécatronique de conception testés.....	145
Figure 109 Schématisation des différents comportements testés.	146
Figure 110 Photo des deux prototypes de systèmes mécatroniques pour la construction	147
Figure 111 Hypothèse de réduction du problème de mise à l'aplomb.....	148
Figure 112 Schémas du montage électronique sur le microcontrôleur.....	148
Figure 113 Algorithme simplifié du programme de mis à l'aplomb.....	149
Figure 114 Hypothèse de réduction du problème de niveau de coffrage de plancher	149
Figure 115 Schémas du montage électronique sur le microcontrôleur.....	150
Figure 116 Algorithme simplifié du programme de mise à niveau	150
Figure 117 Exemples de représentations d'un système mécatronique par des acteurs de la construction sous forme d'algorithmes.....	152
Figure 118 Exemples de représentations d'un système mécatronique par des acteurs de la construction (dessin).....	152
Figure 119 Exemples de représentations pour l'optimisation d'un système mécatronique par des acteurs de la construction	154
Figure 120 Exemple de concepts pour des systèmes automatisés de démolition/reprises. Création de passages de gaines dans une poutre (g). Création de passage de gaines dans un plancher (d).157	
Figure 121 Exemples de concepts pour des systèmes constructifs automatisés. Pose et scellement d'une poutre en façade (g). Coulage d'une dalle par distribution de béton(d).....	158
Figure 122 Exemple de Hype Cycle (Wikipedia, 2017a)	163
Figure 123 Exemple de projets echord ++.....	165
Figure 124 Technique du tirage de chape	168
Figure 125 Truelle mécanique.....	168
Figure 126 Détection automatique de la pression sur une lisseuse hydraulique autoportée (Allen & Al, 2013).....	169
Figure 127 Contrôle automatique du tangage sur une lisseuse hydraulique autoportée (Hanson & Al, 2013).....	169
Figure 128 SCREED ROBO 1 & 3 pour le lissage de chape (Okuda, Yanagawa, Kawamura, Ochiai, & Aoyagi, 1992)	170
Figure 129 Soffito, guidage par laser d'unité mobile sur chantier (Salagnac et al., 1990)	170

Figure 130 MARK 1, 2 et 3, unité mobile autonome pour le lissage de chape (Tanaka et al., 1986) .	171
Figure 131 projet SHAMIR pour la dépose de céramique (Navon, 1995)	171
Figure 132 ROBOTUS- Système autonome de guidage sur lisseuse mécanique autoportée (STRATEX FLOOR, 2014)	172
Figure 133: Représentation théorique de l'enchaînement de concepts et des influences sur les projets Cositros et Roscof	173
Figure 134 Vue des circulations et des éléments à déposer	176
Figure 135 Représentation architecturale de la résille	178
Figure 136 Dessin technique du mode constructif par table coffrante	181
Figure 137 Méthodologie de percement pour la fixation d'une lierne sur une paroi moulée	182
Figure 138 Exemple de concepts de robots de percement réalisés en ingénierie simultanée.....	183
Figure 139 Modélisation du prototype de robot perceur réalisé en part propre.....	183
Figure 140 Interface de commande pour les tests de mouvements et interface de contrôle pour les tests de prise en main chantier	184
Figure 141 Prototypes physiques lors des tests en laboratoire et sur chantier.....	184
Figure 142 Eléments de descriptions de la robotique de construction((IAARC, 1998)).....	189
Figure 143 Prototypes de systèmes de coffrage automatisés.	189
Figure 144 Analyse de la conception d'un outil mécatronique par la sémantique architecturologique	190
Figure 145 Illustrations s'approchant du concept de robot de percement	193
Figure 146 Modélisation C-K du processus de génération de concept.....	194
Figure 147 Documentation constructives courantes associées au concept de robot perceur.....	195
Figure 148 Modélisation complète du mode constructif sur lequel les percements interviennent ..	195
Figure 149 Schématisation initiales d'un système de percement automatisé	196
Figure 150 Deuxième étape de schématisation par modélisation d'assemblages techniques	196
Figure 151 Modélisation C-K du processus de gestion de concept par un intégrateur en robotique	197
Figure 152 Simulations de résistance mécanique et cinématiques du prototype.....	198
Figure 153 Variantes d'assemblages mécaniques avant production	199
Figure 154 Tests en laboratoires et sur site à différents stades de conception	199
Figure 155 Modélisation C-K du processus de prototypage	200

Introduction

Notre époque a vu l'émergence de l'industrie comme mode privilégié de la production. Passant de la manufacture à l'usine, les progrès techniques ont accompagné ses évolutions, avec aujourd'hui l'informatique et la robotique comme emblème de réussite. À l'heure où l'architecture évolue grâce au numérique, le chantier de construction reste un bastion du travail manuel. Nous pouvons évidemment nous interroger sur les raisons de cet état. Nous pouvons aussi nous interroger sur les moyens d'action que nous avons à notre disposition et les penser pour les maîtriser. La mécatronique, comme un grand nombre d'outils numériques, est encore en développement dans la construction. Il nous paraît alors nécessaire de connaître les enjeux de conception relatifs au développement de ces nouvelles technologies ayant vocation à intégrer les chantiers de construction.

La conception de la construction s'organise autour d'acteurs ayant chacun un rôle. Théoriquement l'architecte propose des concepts que le maître d'ouvrage sélectionne puis le constructeur fait émerger l'édifice et est supervisé par les deux premiers. C'est pourquoi même si nous parlons de construction nous invoquons le regard des architectes sur notre recherche. Nous ne voulons restreindre cette recherche à l'architecture, mais le rôle de l'architecte rend son implication nécessaire dans l'accompagnement des changements qui auront lieu sur chantier. Les acteurs du développement de la mécatronique sont aussi concernés. D'ailleurs la mécatronique est un domaine de conception à part entière. Elle n'a pas le même ancrage historique que l'architecture, mais elle porte un certain nombre de caractéristiques semblables. Enfin nous nous adressons aux acteurs de la construction. Ces derniers sont en partie privés de la conception de leur production. Ils n'en restent pas moins responsables de ses évolutions. Nous espérons permettre à tous les acteurs de la construction de s'approprier la notion de mécatronique dans leurs activités de conception du cadre bâti.

Concevoir la mécatronique pour le chantier peut faire intervenir divers domaines en sciences humaines. Par exemple traiter des considérations techniques ou sociétales, par les usages ou les catégories sociales, ou encore des réflexions purement philosophiques. Nous ne pouvons répondre à toutes les questions qui émergent face au développement de la mécatronique dans le domaine de l'architecture et de la construction. La mécatronique est un champ de l'ingénierie et des technologies. Ce champ est dit « pervasif ». Ceci implique un grand nombre d'approches potentielles sur un sujet qui est complexe. Ce constat nous mène au besoin de construire de nouveaux outils et les méthodes qui les accompagnent, pour appréhender, concevoir et diffuser la mécatronique sur les chantiers. Pour s'assurer d'un ancrage scientifique pertinent, nous avons construit cette recherche autour des processus de conception d'un point de vue pratique et théorique. Nous avons besoin d'un prisme pour l'étudier et l'organiser. Les sciences de la conception nous ont paru nécessaires dès le départ. Nous avons donc acquis des connaissances sur la conception architecturale dans un premier temps, pour ensuite nous tourner vers des théories capables d'expliquer les processus de conception observés.

Avant d'être une recherche en architecture, cette thèse est celle d'un architecte. Nous avons donc un regard particulier sur la manière de conduire une recherche. Nous parlerons de processus de conception émergents et pour cela nous avons dû endosser le rôle de concepteur.

Cette recherche fut faite au sein d'une entreprise de construction pour laquelle nous avons apporté des connaissances mais aussi des compétences propres à la pratique de l'architecture. Nous avons mobilisé ces compétences pour l'accompagner dans ses réflexions sur l'intégration de la mécatronique pour ses chantiers.

Nous avons ainsi dû assumer une posture propositionnelle proche de la recherche action, nous poussant à définir une méthode de recherche adaptée. Notre rôle en plus de celui de chercheur fut de catalyser d'une part les besoins venant des chantiers et de l'autre nos aspirations à produire de nouvelles connaissances. Avant d'être une recherche ce fut donc une aventure collective autour des métiers de la construction et un jeu d'équilibre entre une pratique et la construction d'une pensée.

Ce travail a permis d'alimenter des réflexions théoriques se rapprochant des sciences de la conception. Mais avant de pouvoir énoncer le moindre postulat théorique sur la conception conjointe de l'architecture et de la robotique, nous souhaitions connaître la pratique de la mécatronique. Nous avons donc procédé à diverses expérimentations basées sur l'introduction de supports de la conception mécatronique dans le milieu de la conception de la construction.

Un premier travail sur les machines à commandes numériques nous a permis de voir les limites qu'elles imposent dans la réflexion vers la fabrication. Nous nous sommes alors tournés vers un autre type d'outils : les microcontrôleurs. Ceux-ci ont permis de réaliser des prototypes répondant à des besoins de conception de machines imaginées pour le chantier. Cet apprentissage du fonctionnement des outils de prototypage rapide les plus simples fut aussi une base suffisante pour la formulation de principes de conception de robots de constructions prenant en compte les mesures attribuées par l'architecte et celles réalisées sur le chantier. En définitive, nous espérons pouvoir faire émerger une meilleure compréhension tant du monde de la construction que des logiques d'innovation pour favoriser le développement de la robotique sur les chantiers.

Nous verrons dans une première partie le contexte général de cette recherche et l'état des connaissances sur ce qui constitue mécatronique de conception et mécatronique de construction. Dans la deuxième partie nous expliquerons les méthodes de recherche employées pour être au plus près du terrain de la conception. La dernière partie nous permettra d'exposer nos observations sur l'introduction de la mécatronique de conception dans une pratique de construction, le montage de projets de robotique de construction et enfin nos analyses via les sciences de la conception pour établir des règles de conception.

Partie 1. Mécatronique et Architecture : Innovation de la construction ou innovation de la conception ?

Cette partie a pour objet la définition des problématiques en lien avec la mécatronique en architecture.

Y sont traités :

- *Les enjeux de l'étude de la robotique de construction sous l'angle de la conception*
- *Les ancrages scientifiques permettant cette étude.*
- *Le contexte de la mécatronique en architecture et en construction.*
- *L'état des connaissances sur les sciences de la conception et leurs applications potentielles.*

Chapitre 1. Mécatronique de construction : Une tendance de l'innovation en architecture ?.....	21
Chapitre 2. L'objet de la recherche : Connaitre les processus de conception de la mécatronique pour innover dans la construction.....	25
Chapitre 3. Etat des connaissances : Contexte de la mécatronique en architecture.....	33
Chapitre 4. Connaissances de la conception pour la maîtrise des objets techniques.....	79

Chapitre 1. Mécatronique de construction : Une tendance de l'innovation en architecture ?

Dans ce chapitre nous abordons la question du contexte dans lequel s'insère cette thèse et de l'intérêt de la problématique de gestion des processus de conception pour maîtriser le développement du numérique en architecture et en construction.

Nous aborderons très succinctement le phénomène de d'intégration progressive de la mécatronique en architecture et en design via la dynamique des Fab-Lab. Puis nous évoquerons l'absence relative de la mécatronique dans la pratique constructive. Nous enchaînerons sur l'existence de propositions d'accompagnement de l'innovation via les théories de la conception. Enfin nous exposerons le projet de cette recherche d'initier une pratique et une pensée organisée de la conception pour la robotique de construction dans l'industrie.

1. L'émergence de la mécatronique dans la pratique architecturale

« Firmitas, utilitas voluptas »

C'est ainsi que Vitruve définissait les engagements que doit tenir l'architecte. Nous allons voir que la question de la mécatronique pour le chantier n'est pas si éloignée de ce poncif, car son développement est censé incarner la conception architecturale. Nous le verrons à travers les travaux d'architectes sur le sujet, nous le verrons aussi à travers notre terrain de recherche. Nous en verrons aussi les limites car la conception est une autre prérogative de l'architecte. Elle l'est grâce à un cadre législatif, mais elle l'est surtout dans la pratique. Une part de la conception des ouvrages ne se fait pas sur chantier et la mécatronique de construction doit intégrer les concepts formulés par les architectes.

Des outils tels que les machines à commandes numériques et les microcontrôleurs apparaissent progressivement dans le monde de l'architecture. Ils permettent aux architectes de prototyper et formuler des concepts orientés sur l'introduction de la robotique dans le cadre bâti, mais aussi dans les procédés constructifs. (Renoult, 2015). Ces outils ont tous en commun le fait qu'ils se basent sur l'électronique, la mécanique et l'informatique. Ils sont donc issus de disciplines à priori distinctes de l'architecture. L'association de ces disciplines converge vers une discipline de conception appelée mécatronique.

Ce déploiement de la mécatronique dans la pratique architecturale se fait sans employer son nom. On parlera de robotique de construction, de domotique, ou plus récemment d'Architectonique (Meyboom, Wojtowicz, & Johnson, 2010). Pourtant la mécatronique semble avoir des caractéristiques similaires à la conception architecturale. Le mécatronicien prend en quelques sorte le rôle de maître d'œuvre d'un système ou d'une machine. Cette sémantique empruntée au monde la construction est

d'ailleurs employée dans l'industrie du numérique avec l'apparition de fonctions telles que celles des architectes réseaux ou logiciels.

Les formations d'architecte ou d'ingénieurs de la construction intègrent progressivement des enseignements issus des pratiques de la conception centrés sur les technologies numériques. Néanmoins, à l'exception du BIM, l'industrie de la construction n'a pas créé les métiers associés à ces nouveaux savoirs. Les architectes et les constructeurs ont peut-être besoin de maîtriser les concepts de la mécatronique par d'autres moyens que les connaissances techniques. Notre recherche a pour but d'y répondre en explorant la génération de concepts associant mécatronique et construction.

2. L'absence de mécatronique dans les procédés constructifs

Si l'on observe les chantiers d'aujourd'hui la mécatronique semble absente. Les dernières évolutions notables sur les chantiers sont la mécanisation des éléments de coffrage, le développement des engins de levage et la préfabrication. L'informatique existe tout de même sur les chantiers grâce à l'introduction du BIM. Il y a donc ici des ingrédients de base de la mécatronique. On pourrait donc s'attendre à ce que la prochaine évolution des chantiers ne soit que l'assemblage de ces systèmes mécaniques et informatiques. En effet le monde de la construction s'interroge depuis quelques années sur les moyens de déployer la mécatronique de construction en France (Salagnac & Peyret, 1993) et à l'international (Hasegawa, 1991).

La mécatronique de construction existe donc à l'état de prototype. Elle est très présente dans les publications scientifiques et dans les revues professionnelles sur le bâtiment. Par ailleurs des travaux ayant les mêmes visées que le nôtre font l'objet de publications depuis les 30 dernières années (Bock, 1988a), (Bock & Linner, 2015). Ceux-ci portent des aspects pratiques que nous allons présenter dans ce mémoire.

Ils traitent principalement des moyens à mettre en œuvre pour l'industrialisation de la construction, mais font rarement état du point de vue des concepteurs de ces systèmes. Ceci nous conforte dans l'idée qu'il est nécessaire d'étudier les processus d'appropriation de la mécatronique par le monde de la construction et développer sur cette base des outils favorisant son émergence dans les modes constructifs.

3. Les besoins de générer de l'innovation et de la maîtriser

L'innovation fait partie des activités courantes dans le monde industriel. A l'intérieur de l'entreprise l'innovation est perçue comme un élément créateur de valeur, mais aussi synonyme de concurrence. L'innovation devient une activité de production qui nécessite d'être pensée. On parle de régimes d'innovations, et nombre d'observateurs tendent à dire qu'ils s'accélèrent (Garel, 2007). Le monde scientifique produit des études pour accompagner les entreprises dans ces changements, notamment à travers les sciences de gestion (Sellami Mezghanni, 2010). Les sciences de la conception se proposent aussi de répondre à ce besoin d'innovation. La méthode TRIZ ou la théorie C-K en sont de bons exemples. Ces théories de la conception mettent en avant la compréhension des processus de conception pour favoriser la production de concepts innovants (Hatchuel & Weil, 2003).

La construction est tout autant concernée par ces régimes d'innovation. Le besoin d'innover dans la construction à travers la robotique est d'abord né au Japon (Pflimlin, 2017). Cette dynamique n'est pas récente mais ne semble pas encore avoir intégré les pratiques sur les chantiers.

Des travaux sur les sciences de la conception existent en architecture. Ils traitent tant de la pratique de conception à travers l'activité de projet architectural (Lebahar, 2007) que de notions plus théoriques permettant créer des modèles de la conception architecturale (Boudon, 1975) (Tric, 1999) et par extension des modèles de la conception tendant vers d'autres disciplines (Boudon, 2005). Elles sont le support de développement de recherches portant sur la production d'outils d'aide à la conception architecturale (De Boissieu, Lecourtois, & Guéna, 2010). Il y a donc là un point de rencontre entre les technologies numériques et la pratique architecturale. Malgré tout la part de la conception de la construction, et celle de la robotique sont encore peu explorées. Il apparaît donc utile de développer cette partie pour répondre aux volontés d'innovation dans ce domaine.

4. Initier une pratique et une pensée de la mécatronique sur les chantiers

Comme nous l'avons vu l'émergence de la mécatronique dans la palette des outils disponibles pour la conception de la construction se confronte à une relative absence dans la pratique. Néanmoins le besoin de changement est présent et se ressent dans les milieux industriels, académiques et scientifiques. Il paraît nécessaire d'offrir des outils pratiques et théoriques afin de favoriser ces changements. Des savoir sur la conception existent en mécatronique, en architecture et en construction. Mais aucun ne permet d'expliquer ce qui va générer des concepts faisant converger ces processus tout en permettant de les maîtriser pour garantir leur émergence sur les chantiers.

Nous proposons d'observer ces processus à l'intérieur d'une entreprise de construction. Pour ce faire nous allons devoir agir sur ses activités de conception des chantiers en intégrant la composante « mécatronique ». Ces observations seules ne peuvent permettre de percevoir les mécanismes de conception. Nous devons les regarder à travers le prisme des sciences de la conception.

Nous expliquerons comment ce travail a permis de faire apparaître les liens entre conception architecturale et mécatronique lors de la réalisation de systèmes pour les chantiers. La notion de mesure se retrouve dans les deux disciplines. Elle porte un potentiel d'analyse, mais peut aussi devenir un vecteur de projet pour la réalisation de chacun des outils mécatroniques d'un chantier. Connaître l'ensemble des mesures attribuées par l'architecte à un ouvrage pourrait permettre de concevoir l'ensemble des outils mécatroniques nécessaires à sa réalisation (Zedin, Guéna, & Marchand, 2016).

Pour compléter cette recherche, nous nous sommes intéressés aux processus de conception de ces mêmes systèmes mécatroniques sur chantier. Le cas de la conception d'un robot de percement, analysé grâce au prisme de la théorie C-K nous a permis de faire des modélisations de ce processus et de faire apparaître les éléments nécessaires au passage du concept au prototype. A terme ces résultats pourraient être réexploités dans la gestion de projets de robotique de construction (Zedin, Vitalis, Guéna, & Marchand, 2017).

5. Synthèse

Nous venons de voir que la mécatronique se développe dans le monde de l'architecture, notamment à travers l'intégration de nouveaux outils, mais surtout par l'attrait pour le prototypage. Ce développement est fait néanmoins face à des freins. En effet la scission entre architecture et construction limite la diffusion de ces pratiques. C'est d'ailleurs un constat que nous pouvons faire sur chantier où la mécatronique n'est pas présente. Elle n'est pas non plus présente sous la forme dont elle a été imaginée dans les années 70 à 90 via les travaux du CSTB ou les recherches au Japon sur la robotique de construction.

Nous avons vu que les logiques d'innovation ne sont pas forcément naturelles dans l'industrie et qu'elles peuvent être accompagnées. Des théories industrielles s'appuient sur les sciences de la conception pour connaître et appuyer la recherche et développement (TRIZ, C-K Theory). Des travaux similaires en sciences de la conception existent pour l'architecture avec l'Architecturologie.

Nous terminons par la proposition d'étude de ces phénomènes dans l'industrie de la construction. Nous aborderons plus précisément ce travail dans le chapitre suivant, exposant la problématique et l'ancrage scientifique mobilisé.

Chapitre 2. L'objet de la recherche : Connaitre les processus de conception de la mécatronique pour innover dans la construction.

L'objectif de ce chapitre est d'exposer le contexte scientifique dans lequel s'insère cette recherche avant de poser la problématique. En effet la recherche en architecture est vaste car elle prélève potentiellement dans toutes les disciplines de recherche. La mécatronique peut aussi être traitée sous différents points de vue. Ainsi, nous précisons ici l'objet de recherche à travers la présentation des travaux du laboratoire Modélisation pour l'Assistance à l'Activité Cognitive de la Conception.

Nous présenterons les origines de l'étude de l'architecture sous l'angle des sciences de la conception. Nous verrons le développement progressif d'applications pour ce domaine de recherche et son rapprochement avec l'étude des outils numériques en architecture. Enfin nous parlerons du potentiel de ce cadre scientifique pour la fabrication numérique que nous souhaitons faire émerger à travers notre recherche.

Enfin nous identifierons les questions de recherche que nous allons traiter sur les outils de mécatronique de conception, la gestion de projets de robotique de construction et la modélisation de ces processus de conception.

1. Ancrage scientifique

1.1. Introduction

Cette recherche est née de la volonté de trois acteurs aux intérêts différents mais non divergents. D'abord la nôtre guidée par la quête de connaissances concernant les évolutions du numérique dans le champ de l'architecture. Le laboratoire MAACC, intéressé par les potentielles connaissances créées pour l'aide à la conception architecturale. Et l'entreprise Vinci, misant sur l'innovation comme moteur de croissance. Ces volontés croisées ne constituent pas à elles seules un objet de recherche. Nous allons exposer ici comment nous avons fait converger notre questionnement de départ vers un ancrage scientifique solide, porté par l'un des nombreux laboratoires de recherche en architecture.

La recherche en architecture se construit aujourd'hui à travers plusieurs prismes disciplinaires. Ils se rapportent pour l'essentiel aux sciences humaines. Notre sujet aurait pu être traité au sein de nombre de ces disciplines. Par exemple, les sciences de gestion auraient pu constituer un ancrage scientifique solide, notamment par son rapport au monde de l'entreprise. La philosophie aurait sûrement permis

de construire une pensée transcendant notre sujet et le rendant plus facilement généralisable. L'anthropologie et la sociologie nous auraient permis de prendre en considération de manière fine les acteurs de chacun de nos terrains, et de fournir des réponses détaillées à notre problématique.

Il nous a semblé que notre question de recherche portait déjà un grand nombre d'éléments nous éloignant de l'architecture. Il nous fallait donc traiter ce sujet à l'aide d'une notion centrale pour l'architecture, mais aussi capable de nous plonger dans le champ de la mécatronique et de la construction. Nous avons pu constater, au sein de la recherche en architecture, à maintes reprises, l'occurrence d'un thème qui nous semble fondateur, celui de la conception. Même si l'étude de la conception n'est pas le cœur de l'ensemble de ces recherches, leur diffusion se fait souvent à la faveur d'objectifs opérationnels et donc pour l'émulation, l'appui ou l'évolution de problèmes de conception présents dans la pratique architecturale. Le laboratoire MAP¹ au sein duquel nous travaillons sur cette recherche construit un point de vue semblable par des approches de l'instrumentation de la conception en s'appuyant sur la connaissance du numérique et des sciences de la conception.

La richesse des recherches faites au sein de ce laboratoire ne permet pas d'en citer l'ensemble. Nous souhaitons décrire notre positionnement pour cette recherche, aussi nous nous concentrerons sur la description de recherches faites au sein de l'unité de recherche MAACC² à laquelle nous sommes rattachés. Ces descriptions nous permettront de faire apparaître le point de départ de notre réflexion pour la constitution d'un objet de recherche singulier mais non isolé.

1.2. Sciences de la conception pour l'architecture

Les sciences de la conception désignent l'étude des processus de conception (Boudon, 2005). Ce champ de recherche a fait l'objet d'un grand nombre de travaux permettant de spécifier la conception architecturale. Ces travaux ont fait naître une nouvelle discipline à l'intermédiaire entre les sciences de la conception et les sciences cognitives : l'Architecturologie (Boudon, 1975). Le but de cette discipline est d'abord de « Comprendre comment l'architecte donne des mesures à l'objet architectural » (Boudon, 1992). Ces recherches ont progressivement permis de faire apparaître un modèle de la conception architecturale composé de classes d'opération de conception de mesures. Celles-ci sont relatives à différents niveaux de référence qui constituent des échelles architecturologiques (Ben Rajeb, 2012).

Ce savoir constitué sur la conception a permis d'enseigner la conception architecturale (Boudon, Deshayes, Pousin, & Shatz, 1994), puis de l'analyser sous la forme d'Architecturologie appliquée (Lecourtois, 2004). Ces applications ont fait apparaître des outils d'aide à la collaboration (Lecourtois, 2011), de définition d'un style collectif propre à un milieu (Bejaoui, 2017) ou de gestion de projets urbains (Lecourtois, 2015).

Notre recherche n'a pas pour but premier de faire évoluer le modèle Architecturologique. Toutefois cette connaissance de la conception et de ses applications a été le point de départ de notre réflexion sur la convergence entre la conception architecturale et la mécatronique. Cette volonté fut renforcée

¹ UMR 3495 CNRS/MC Modèles et simulations pour l'architecture et le Patrimoine

² MAACC : Modélisations pour l'assistance à l'activité cognitive de la conception. Cette unité de recherche est issue de la fusion du LAREA et de l'ARIAM, tous deux rattachés à l'ENSAPLV.

par la nature de certaines des applications se rapportant à l'appropriation des technologies numériques.

1.3. Conception architecturale numérique

Nous avons évoqué le fait que la connaissance de la conception architecturale permet de produire des outils d'analyse et d'aide à la conception. Ces outils sont transposables dans l'étude des outils numériques pour faciliter leur appropriation par les concepteurs (Lecourtois & Guéna, 2007) (Delaveau, Guéna, & Lecourtois, 2009). Nous citons précédemment l'étude des modèles de la collaboration ayant permis d'élaborer des outils d'aide à la conception. Ces travaux sont le support de développements d'interfaces numériques permettant d'instrumenter la conception en collaboration (Ben Rajeb & Leclercq, 2014). Suivant la même démarche, des recherches sur la conception grâce aux outils de modélisation paramétrique ont permis de mettre au jour des opérations cognitives distinctives de ces activités (De Boissieu, Guéna, & Lecourtois, 2010), (De Boissieu, Lecourtois, & Guéna, 2011). Sur cette base se sont construites des méthodes d'appropriation et d'enseignement de ces outils (De Boissieu, Lecourtois, & Guéna, 2009) (De Boissieu, Lecourtois, et al., 2010). Par extension, ce type de recherche conduit au développement de nouveaux outils d'aide à la conception et d'explorer de nouveaux champs tels que l'aide à la création (Silvestere, Ikeda, & Guena, 2016).

Avec notre recherche nous nous rapprochons de ces différentes démarches car nous souhaitons étudier une activité de conception faisant intervenir des outils numériques. Toutefois notre objet de recherche nous éloigne de la conception architecturale. Nous devons garder une structure commune à ces recherches mais nous ne pourrions pas appliquer exactement les mêmes méthodes. Pour être plus précis, notre étude ne pourra pas faire intervenir seulement l'Architecturologie comme prisme d'analyse, nos résultats iront au-delà de la formulation d'opérations de conception architecturales et nous n'aboutirons pas à la production d'outils d'instrumentation de la conception.

1.4. Conception architecturale et patrimoine

La conservation du patrimoine fait aussi parfois intervenir des activités de conception. Ces activités peuvent être instrumentées pour l'aide à la décision. Les technologies numériques apportent leur puissance de calcul ainsi que des interfaces. La conception de ces outils doit être orientée en faisant intervenir diverses expertises. C'est dans ce cadre que des recherches intégrant connaissances de la conception, du patrimoine et des technologies numériques ont été menées au sein du MAACC. Les applications couvrent l'aide à la modélisation de structures maçonnées pour leur analyse et leur conservation (Ciblac & Morel, 2014) (Oikonomopoulou, Ciblac, & Guéna, 2009) ainsi que la reconstruction d'éléments architecturaux pour l'aide à la visualisation du patrimoine (Autran & Guena, 2015). Ces travaux rejoignent un des axes de recherche du MAP

Nous verrons dans nos recherches que la conception d'outils mécatroniques pour la construction fait parfois intervenir des notions similaires. En effet tant la réhabilitation des ouvrages que l'intervention en cours de chantier fait intervenir des étapes nécessaires à la maîtrise des existants. Il est aussi important de noter que les exemples que nous avons choisis ne font pas intervenir les sciences de la conception. Il nous apparaît donc possible de produire des connaissances sur les outils et pratiques de la conception au-delà du cadre d'une étude centrée sur la conception architecturale.

1.5. Architecture et éco-conception

Le développement durable répond à des enjeux modernes de transformation de la société. De nouvelles pratiques de la conception émergent sont observées par le monde scientifique pour les spécifier et les accompagner. L'Architecturologie trouve une fois encore des applications pour l'analyse et donc la connaissance de la conception urbaine durable (Lecourtois, 2015).

Le numérique trouve aussi sa place dans l'aide à l'éco-conception. Par exemple la connaissance des outils mathématiques tels les réseaux Bayésiens associés aux connaissances sur la conception de la performance énergétique des bâtiments ont permis de produire des outils numériques d'aide à la décision (Hannachi-Belkadi, 2008).

Encore une fois, des applications des connaissances de la conception permettent de produire des analyses sur des activités de conception et des outils d'aide à la conception. Notre objet de recherche est à priori hors du champ du développement durable. Nous parlerons donc peu d'éco-conception. Malgré tout nous trouvons des liens avec ces recherches par les méthodes employées pour comprendre et assister de nouvelles pratiques de la conception.

1.6. Fabrication numérique et la conception : Un nouveau champ de recherche

Les recherches faites au laboratoire MAP-MAACC prennent leur sens vis-à-vis du numérique parce qu'elles deviennent le support de développement d'outil de conception. L'objet de notre recherche porte en partie sur les outils d'aide à la conception puisque nous nous intéresserons au prototypage rapide et aux machines à commandes numériques. De plus la mécatronique est une démarche de conception et c'est pour cela que nous avons besoin des sciences de la conception pour l'étudier. Nous avons pu constater la pertinence de l'application des modèles de la conception à travers l'Architecturologie. Nous nous appuyerons donc sur les savoirs constitués dans l'utilisation du modèle architecturologique comme grille d'analyse et comme support de développement des activités de conception instrumentées.

Notre recherche porte sur les aspects d'innovation provoqués par l'introduction d'une nouvelle technologie dans les activités de conception de la construction. Nous avons pour objectif de mettre au jour les éléments de conception émergeant d'un contexte d'intégration de la mécatronique sur chantier. Là encore l'emploi du modèle Architecturologique a montré sa capacité à spécifier de nouvelles pratiques de la conception. Nous allons devoir observer ce qui apparaît dans la conception d'outils mécatroniques pour les chantiers, puis les analyser grâce aux théories de la conception. Enfin nous pourrions formuler des propositions de modèles pour la distribution de connaissances ou leur structuration dans le cadre de projets similaires.

Notre objet de recherche concerne plusieurs corps de métiers : architectes, ingénieurs de la construction, intégrateurs en robotique. Pour que nos réflexions soient généralisables, nous souhaitons éviter ce cloisonnement. Nous devons élargir l'étude au-delà de l'architecture. Cela ne veut pas pour autant dire qu'il ne s'agit plus d'une recherche en architecture, puisque nous étudions des objets relatifs à l'architecture. Mais d'un point de vue scientifique notre recherche porte sur la conception.

Avec notre recherche, nous ouvrons le champ de la fabrication numérique. Celui-ci n'était préalablement pas présents au sein de notre ancrage scientifique. Cette recherche va nous pousser à réfléchir sur des enjeux épistémologiques. Nous devons étudier ce qui constitue le champ de la

mécatronique et comment identifier les activités de conception instrumentées de celles portant sur la fabrication. Nous devons aussi explorer le champ de la conception pour identifier ce qui peut faire sens pour différentes catégories de concepteurs. Les différents thèmes que nous allons traiter sont présents des domaines qui ne se restreignent pas à l'architecture. Nous allons puiser dans ces recherches pour compléter notre objet.

2. Problématique :

Le constat de pratiques émergentes autour de la mécatronique dans le monde de l'architecture et de la construction nous a dirigés vers une question portant sur les origines de son développement. Il n'est pas question ici de reconstruire l'histoire du développement de la mécatronique dans le monde de la construction, mais de comprendre ce qui fait naître un concept de fabrication grâce à la mécatronique et ce qui conduit à sa réalisation. Nous avons construit un questionnaire assez large pour associer tous les acteurs de la construction et de la mécatronique et assez précise pour produire des connaissances opérationnelles.

Comment déterminer des opportunités d'intégration de la mécatronique sur chantier ?

La mécatronique est à l'origine une démarche d'intégration de la mécanique et de l'électronique en synergie lors de fabrication ou dans les fonctions d'un produit. Il s'agit d'une démarche de conception que l'architecture peut aborder de plusieurs manières. Nous nous intéressons ici à la manière dont la mécatronique peut être pensée lorsqu'il s'agit du processus de fabrication de l'architecture. Nous cherchons à connaître les processus de conception de la robotique de construction et particulièrement ceux permis par l'instrumentation de ces processus grâce à la mécatronique de conception. Nous souhaitons enfin connaître les moyens de spécifier ces processus de conception grâce aux sciences de la conception. Nous pouvons résumer notre problématique à travers ces trois questions de recherche :

- Quels outils peuvent être supports de la conception de la mécatronique pour les chantiers ?
- Comment conduire un projet de conception de robot de construction ?
- Comment modéliser la conception de la mécatronique de construction ?

2.1. Quels outils peuvent être supports de la conception de la mécatronique pour les chantiers ?

Nous verrons dans notre état de l'art que les outils de prototypage rapide et de fabrication assistée par ordinateur peuvent générer des formulations de concepts. Nous intégrons tous ces outils dans une catégorie que nous appelons mécatronique de conception. Ces formulations de concepts sont riches et permettent d'entrevoir un renouvellement des modes constructifs. Mais il s'agit de pratiques récentes qui n'ont pas encore intégré les entreprises de construction.

Comment la pratique de la mécatronique de conception peut être introduite dans le monde de la construction ? Comment fait elle naître des projets de mécatronique de construction ?

Nous posons les premières hypothèses suivantes :

- Les machines à commande numérique peuvent permettre de générer des modèles ou des réflexions sur des modes de production à différentes échelles.

- Les microcontrôleurs peuvent permettre de produire des prototypes de systèmes mécatroniques adaptés au chantier.

2.2. Comment conduire un projet de conception de robot de construction ?

La mécatronique de construction existait avant l'apparition des outils de mécatronique de conception. Un état de l'art existe sur la robotique de construction. Celui-ci fait apparaître des exemples de prototypes de machines employant la mécatronique, ainsi que des principes de conception. Malgré tout nous ne savons pas si ces principes sont applicables dans une activité de conception d'un chantier.

Comment se déroule un processus de conception de la mécatronique de construction ? Quelles sont les problématiques de départ ? Comment y répondre ? La mécatronique est-elle toujours une solution aux problématiques d'innovation générées lors de la conception des chantiers ?

Nous posons les premières hypothèses suivantes :

- Un processus de conception de robotique de construction peut être généré par la connaissance des besoins d'un chantier de construction sur une tâche particulière.
- L'introduction d'un concept issu de la mécatronique permet de générer de nouveaux modes constructifs.

2.3. Comment modéliser la conception de la mécatronique de construction ?

Nous voulons connaître les éléments permettant d'initier un processus de conception de robot de construction. Ces processus paraissent complexes et font intervenir de nombreuses disciplines. Nous souhaitons décrire ces processus et les réduire à travers des modélisations basées sur les sciences de la conception pour les rendre transmissibles. Nos premiers questionnements permettront de répondre aux aspects pratiques avec d'une part les supports de conception et de l'autre la gestion de problématiques faisant intervenir la mécatronique. Il nous reste donc la question du fonctionnement théorique des processus de conception générés par cette activité.

Comment spécifier la conception d'outils mécatroniques sur chantier ? Comment produire des méthodes généralisables à partir des processus observés ?

Nous posons les premières hypothèses que :

- La connaissance de la conception architecturale peut être un point d'entrée pour la conception de robot de construction.
- Les théories de la conception peuvent expliquer le processus de conception d'un robot de construction.

3. Synthèse

Nous avons vu dans ce chapitre que les sciences de la conception, à travers l'Architecturologie ont ouvert un vaste champ d'étude pour l'architecture. Ce projet de connaissance s'est accompagné de projets de développement en éco-conception, dans le patrimoine et dans le numérique en architecture. Ces outils portent tant sur l'aide à la conception que l'aide à la décision et possèdent un potentiel en innovation que nous désirons reproduire pour cette recherche sur la mécatronique en architecture.

Nous aboutissons sur la formulation d'une problématique comprenant à la fois des aspects d'aide à la décision et des aspects d'aide à la conception. Nous souhaitons savoir comment déterminer des opportunités d'intégration de la mécatronique sur chantier. Cela veut dire que nous allons étudier l'instrumentation de la conception par la mécatronique dans un environnement de conception du chantier. Nous allons aussi observer la génération de concepts de robotique de construction sur le même terrain. Ceci afin de connaître les outils et pratiques nécessaires au développement de la mécatronique dans le monde de la construction. Enfin nous décidons d'introduire les sciences de la conception pour leurs capacités à spécifier et modéliser ces phénomènes.

Mais avant de pouvoir conduire toutes expérimentations sur ce sujet, nous devons faire état des connaissances, tant en sciences de la conception que du contexte de la mécatronique en architecture et construction. C'est l'objet des chapitres suivants, où nous trouverons quelques éléments de réponse.

Chapitre 3. Etat des connaissances : Contexte de la mécatronique en architecture

Dans ce chapitre, nous souhaitons définir la mécatronique en architecture et construction. Nous commencerons par travailler sur le thème de la mécatronique. Nous expliquerons pourquoi nous préférons parler de mécatronique et donc d'un processus de conception, plutôt que de robotique, résultat de ce processus. Nous évoquerons les tendances de la recherche en mécatronique à se rapprocher de l'architecture par ses questions sur l'espace.

Nous poursuivrons ce tour d'horizon par l'étude de la robotique en architecture, arrivant progressivement sur le concept de mécatronique. Entre fantasme de la ville en mouvement et production de manifestes pour la fabrication, les architectes oscillent entre cette idée du robot et le système qui le compose. Nous profiterons de cette section pour définir la mécatronique de conception, faisant écho à la mécatronique de construction.

Nous terminerons donc par la mécatronique de construction : état le plus récent de la recherche sur la robotique de construction. Nous en verrons les origines à l'étranger et en France ainsi que les applications identifiées à la fin des années 90.

1. La mécatronique et la robotique

1.1. La mécatronique : origines et définition

La définition de la mécatronique peut sembler simple car elle désigne un assemblage de la mécanique de l'électronique et de l'informatique³. Néanmoins l'histoire de ce qui est devenu progressivement une discipline d'ingénieur, ses usages la rapprochant de la robotique, les influences des mondes industrielles, académiques et politiques, brouillent la définition de la mécatronique. Cet état de fait est par ailleurs décrit dans les ouvrages spécialisés. Le terme mécatronique est inventé en 1969 par l'ingénieur Tetsuro Mori, travaillant au sein de l'entreprise japonaise Yaskawa. Ce terme est une marque enregistrée⁴ par l'entreprise en 1971. Il désigne alors l'assemblage de l'électronique et de la

³ L'introduction de l'informatique dans la définition de la mécatronique est récente. Cela fait souvent référence au contrôle en temps réel et aux circuits programmables utilisés comme substitus à certains éléments d'électroniques tels que les circuits logiques.

⁴ Nous supposons que ceci est une des raisons pour laquelle le mot mécatronique est moins employé que celui de robotique.

mécanique en synergie. De nombreuses controverses ont eu lieu suite à la diffusion du terme et ses évolutions dans les milieux industriels et académiques. Certains, côté recherche, souhaitent conserver la définition originelle, réduisant la mécatronique à des éléments simples se rapprochant du vivant. D'autres souhaitant étendre la définition pour quelle corresponde à l'ensemble des applications de la mécatronique dans le monde industriel (Birglen, 2016)⁵.

La définition de la mécatronique n'apparaît en France qu'en 2005 dans le dictionnaire (Larousse, 2005b). Puis prend la forme d'une norme industrielle en 2008 : « La mécatronique est une démarche visant l'intégration en synergie de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique dans la conception et la fabrication d'un produit en vue d'augmenter et/ou d'optimiser sa fonctionnalité. Cette démarche, qui permet d'obtenir des performances supérieures aux solutions traditionnelles, de réaliser de nouvelles fonctionnalités, et de rendre les produits mécatroniques plus compacts, nécessite la mise en place d'une approche coopérative interdisciplinaire. » (AFNOR, 2008)

Etant une combinaison de domaines, la mécatronique est parfois définie par des représentations sous forme de diagrammes (Figure 1). Nous pouvons observer que la mécatronique est avant tout une maîtrise de différents domaines ainsi que leur convergence. Elle est présentée comme une conséquence de la fusion de chacun d'entre eux. En réalité ceci est le reflet d'une volonté de différencier et d'agréger ces reliquats de corps de métiers encore existants dans le monde industriel (Figure 2).

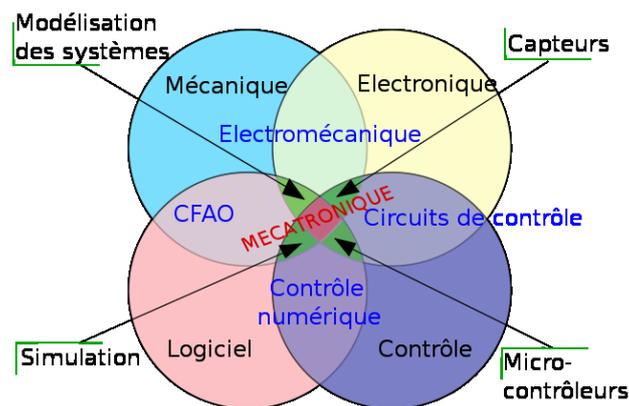


Figure 1 Diagramme d'Ingénierie Mécatronique (Wikipedia, 2008)

⁵ Lionel Birglen est ingénieur en mécatronique, diplômé de l'École nationale supérieure des arts et industries de Strasbourg ; titulaire d'une maîtrise en science sociale et d'un doctorat en robotique. Son ouvrage intitulé *Mécatronique* est sorti sur la période couvrant notre recherche. Nous le prenons tout de même comme référence, car il nous offre une synthèse de ce que nous avons pu observer tout au long de notre recherche. Par ailleurs nous devons auparavant nous appuyer sur la littérature anglophone.

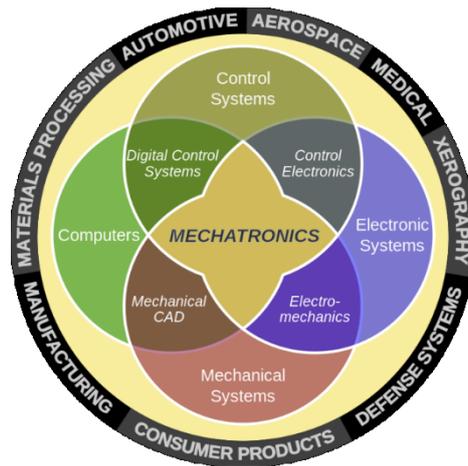


Figure 2 Aerial Euler diagram d'après Rensselaer Polytechnic Institute (Wikipedia, 2012)

1.2. Un vecteur du développement de l'informatique et de la robotique.

La mécatronique existait avant l'invention du terme. La combinaison de l'informatique et de l'électronique et de la mécanique était un élément constitutif des premiers ordinateurs. La machine de Turing en est un bon exemple. Le modèle théorique de Turing a pris la forme d'un système associant mécanique et électronique avant de prendre la forme de systèmes informatiques tels que les puces électroniques et les processeurs.

On retrouve l'association de la mécanique et de l'électronique dans la conception des premiers robots industriels dès 1954 (Zizar, 2014). La mécatronique a permis une évolution des automates sur les chaînes de production. Plus sophistiqués et évitant l'intervention humaine en milieux hostiles, les robots sont aussi reprogrammables avec la possibilité de changer des éléments. L'introduction des semi-conducteurs et de l'informatique moderne ont été une évolution de la mécatronique, les rendant plus fiables et durables. Leur programmation n'est plus seulement mécanique, ils sont donc soumis à d'autres lois de la physique. C'est de ce mélange entre la machine et le système qui la compose que naît la confusion avec un certain nombre de termes voisins.

Le mot « Robot » est bien plus ancré dans la culture que celui de mécatronique. Sûrement car le terme est plus ancien. Il serait apparu pour la première fois en 1920 dans la pièce *Rossum's Universal Robots* de l'auteur Karel. Il serait inspiré du mot tchèque « robota » qui signifie « travail, besogne, corvée » (Zizar, 2014). Robotique, et automation sont donc des termes proches de la mécatronique mais ne désignent parfois pas les mêmes objets. Nous n'aurons donc aucun problème pour employer le terme de robotique à partir du moment où la mécatronique y est employée.

1.3. Définition par des exemples

La robotique industrielle s'appuie sur des familles d'outils. Ces familles décrivent des fonctionnements de base associant mécanique, électronique et informatique. Elles sont ensuite modifiées par combinaison de techniques afin de remplir un rôle sur une chaîne de fabrication, de montage, d'approvisionnement ou d'inspection. Les exemples sont nombreux : Robots anthropomorphes, drones, AGV, robots cartésiens, robot Scara (Figure 3). Nous retrouvons ces familles à échelle réduite, employées pour l'apprentissage, et le prototypage de nouvelles extensions de ces familles (Figure 4). La connaissance de la mécatronique se joue alors à deux échelles. Celle de la machine, et celle de son intégration.

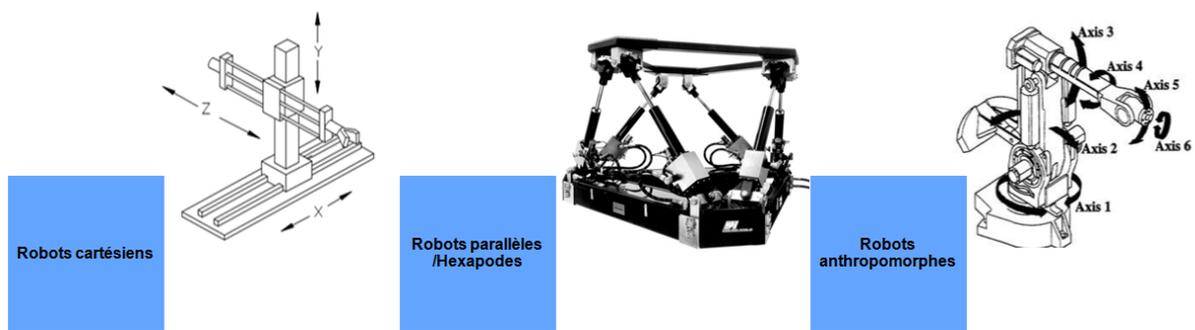


Figure 3 Exemple de familles de robots

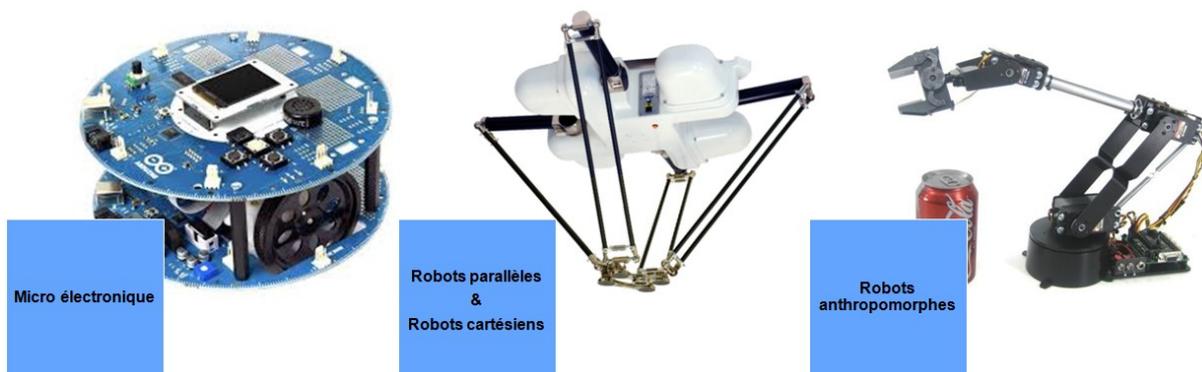


Figure 4 Exemple de plateformes de prototypage de familles de robots

La mécatronique est une technologie dite « pervasive ». Nous la retrouvons dans notre quotidien (photocopieuses, robots ménagers, transports, appareils de communication...) et bien sûr dans le domaine du bâtiment (gestion de la ventilation, climatisation, sécurité, porte automatique, escalator, ascenseur...).

1.4. Lorsque la mécatronique se rapproche du champ de l'architecture

Le champ de la mécatronique a pour vocation d'intégrer tous les aspects de la société, et tend naturellement vers l'architecture. Des ouvrages spécialisés dans la robotique et la CAO nous apportent de précieuses informations sur le lien entre conception de l'espace et mécatronique.

L'étude de robots industriels anthropomorphes à 6 axes ou plus a fait l'objet de recherches sur des stratégies de gestion de l'espace (Figure 5). Agilité et efficacité y sont étudiées comme des contraintes et des enjeux pour la programmation de ce type de robots. Ces études techniques, offrent des visuels très significatifs, concernant les capacités des robots industriels dans l'espace.

Les réflexions sur le rapport entre robotique et architecture se perçoivent aussi à travers la question de la robotique mobile. Ce n'est pas seulement l'espace qui est mis en jeu ici, mais aussi les aspects sémantiques et topologiques (Figure 6). Si les roboticiens, et industriels intègrent des notions d'espace on peut imaginer que l'architecte puisse accéder à ces outils par ces aspects de leur conception.

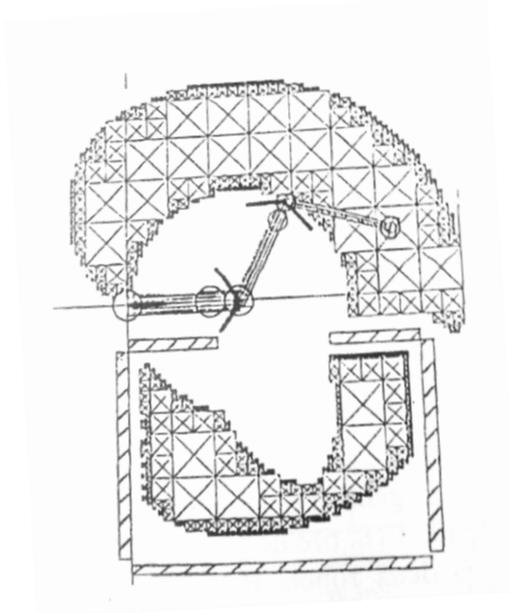


Figure 5 Critères de « meilleur » recouvrement d'un espace visé Vv (Chedmail, Dombre, & Wenger, 1998)

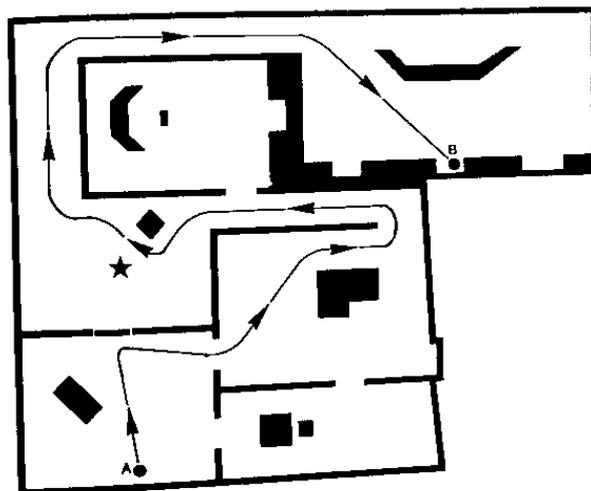


Figure 6 Comportement du robot HILARE dans un problème de navigation (Chatila, Laumond, & Prajoux, 1987)

1.5. Intégrateur en robotique – Maître d'œuvre de la mécatronique ?

La mécatronique produit des secteurs professionnels et industriels. Il y a d'abord les constructeurs en robotique. Ceux-ci produisent les robots industriels standards que nous avons pu observer sous la forme de familles. Le type de robot le plus connu est le robot anthropomorphe. Les constructeurs de ces machines proposent généralement des variantes de ces modèles, ainsi que des solutions modulables facilitant leur mise en œuvre sur des chaînes de production.

L'intégrateur en robotique est un spécialiste de la mécatronique, mais aussi spécialiste de la logistique. Ses clients sont principalement des acteurs industriels et l'intégrateur va opérer sur leurs outils de production. Il peut se charger de la conception d'outils mécatroniques, à l'image du maître d'œuvre

en architecture. Mais dans la pratique, l'intégrateur a une connaissance des familles de robots, et va combiner les outils nécessaires à l'intégration des robots dans leur environnement de travail. Il se repose donc sur le savoir-faire des constructeurs en robotique. Il ne faut pas confondre ces deux métiers et donc apporter une nuance entre intégration et conception d'un robot. Lorsque les demandes d'intégration ne trouvent pas de solutions dans les outils existants les deux fonctions se cumulent.

1.6. Réduire la définition de la mécatronique à des fondamentaux

Nous sommes obligés de limiter notre définition pour construire notre recherche. D'autant plus que nous allons devoir la compléter par l'état des connaissances dans les domaines de la construction et de l'architecture. Nous l'avons fait sur la base de premières observations de ce qui nous intéresse réellement dans la mécatronique pour l'architecture et la construction. L'objet final étant à priori d'étudier les machines capables de construire/fabriquer et employant la mécatronique comme moyen de fonctionnement.

Nous prenons acte que la robotique, l'automation, l'automatisation peuvent être porteurs de sujets menant ou étant concrètement liés à la mécatronique. Nous incluons donc ces champs dans notre recherche, tout en gardant à l'esprit que le passage vers la mécatronique ne peut s'extraire de la dimension technique.

Au cours de notre recherche, nous avons été amenés à définir de manière plus pratique ce qui compose l'essentiel de la mécatronique. Nous l'avons fait à travers une activité de conception/manipulation d'outils de prototypage rapide. Nous posons alors une définition minimale de la mécatronique composée d'éléments matériels (capteur, moteur, contrôleur) et computationnels (algorithmes). Cette définition nous permettra d'aborder sereinement l'étude des activités de conception de la mécatronique pour la construction sans passer à côté du sujet par des débats trop théoriques. La mécatronique est avant tout un processus de conception impliquant des objets techniques.

2. Mécatronique en architecture : Théorie, pratique et recherche.

L'expression du rapport entre architecture et mécatronique est souvent indirecte. Des projets manifestes traduisent les attentes du monde de la conception architecturale vis-à-vis de la technique, parfois issues du réel, parfois imaginées. La mécatronique est aussi expérimentée à travers des projets architecturaux. Cette pratique est accompagnée d'une théorisation des enjeux de la robotique et par extension de la mécatronique pour la fabrication.

2.1. Le fantasme de la robotique

Le mot mécatronique est très peu employé en architecture. Pourtant l'automatisation de la construction est un thème récurrent en architecture. Cette automatisation est parfois décrite sans faire référence aux moyens techniques. D'autres projets n'hésitent toutefois pas à évoquer la robotique. Nous pouvons aussi trouver l'existence de ces thèmes au-delà des enjeux de la fabrication. Lorsque Le Corbusier développe sa vision de l'architecture il déclare qu'« une maison est une machine à habiter » (Le Corbusier, 1925). Cet aspect de l'architecture est soutenu par une approche de l'industrialisation couramment reprise dans la théorie et la pratique architecturale contemporaine.

Certains concepts vont plus loin sur cette vision par des figurations utopiques telles qu'Archigram avec *Plug'in city* ou *Walking city* (Figure 7). Ici la question de la fabrication grâce à la mécatronique est

implicite. C'est l'ouvrage tout entier qui est conçu grâce à ces technologies et qui les inclut dans son fonctionnement.

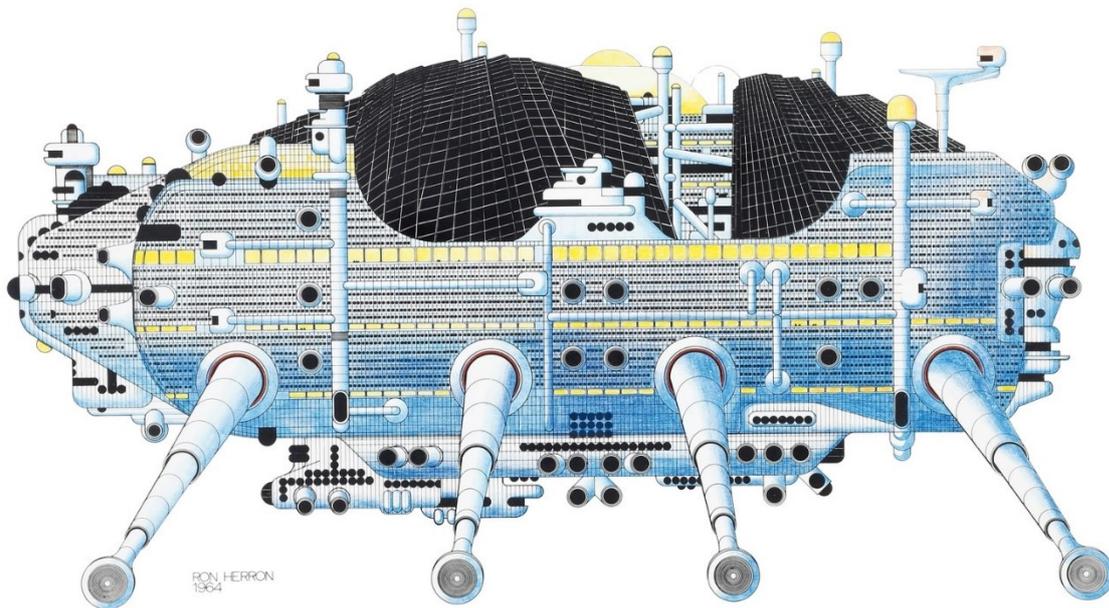


Figure 7 Archigram, Walking City (Project 064), 1964. Image © Deutsches Architekturmuseum

Nous arrivons progressivement à des projets indiquant clairement l'emploi de la robotique pour construire. Le premier travail d'architecte que nous souhaitons évoquer est celui de Jean Magerand et Elisabeth Mortamais⁶. Ils imaginent plusieurs projets associant robotique et construction de l'espace architectural et urbain. « Robots comme des dieux », « Le jardin robotique », « La maison Gallego-Bouvet »⁷ sont autant de manifestes pour une introduction d'une pensée du numérique et de la robotique dans le milieu de l'architecture (Marcel, 2006).

On ne peut prétendre que l'ensemble de ces travaux se font dans une continuité de pensée. Néanmoins les projets prenant la robotique comme espace de référence pour la formulation de concepts architecturaux continuent d'apparaître (Figure 8 et Figure 9).

⁶« Jean Magerand a co-fondé l'Atelier international expérimental pour la Cité Bio-numérique (2011, avec C. Bailly). Il est co-auteur (avec E. Mortamais) de Vers la Cité Hypermédiante (2003) et de Vers l'Hyperpaysage. Tous deux sont membres du laboratoire de recherche E.V.C.A.U. (Espace Virtuel en Conception Architecturale et Urbaine).

⁷ Dans le projet de pavillon pour le concours de la maison Gallego-Bouvet, J. Magerand et E. Mortamais imaginent un système de trame permettant les déplacements d'un robot. Ce robot a pour tâche de placer des éléments constitutifs de la structure de l'ouvrage. Ce projet utopique propose une vision dynamique de la construction, où le robot permet de prolonger le chantier indéfiniment.



Figure 8 Concept de fermes verticales robotisées urbaines - Boston Höweler + Yoon (Housley, 2009)



Figure 9 Olzweg, François Roche/Stéphanie Lavaux/Jean Navarro, 2006, Paris et Frac Orléans

2.2. L'architecture en mouvement

Nous l'avons dit précédemment, la mécatronique ne porte pas seulement des enjeux de fabrication. Des architectes s'intéressent à la possibilité de rendre l'architecture mobile. Nous pourrions citer nombre d'exemples, mais le premier qui vient à l'esprit est celui des moucharabiehs de l'institut du monde arabe à Paris. Ces éléments, censés symboliser un dialogue entre culture occidentale et monde arabe, ont été réinventés par l'introduction d'éléments d'obturation mécaniques et de capteurs de luminosité contrôlés par ordinateur. S'agit-il donc d'une utilisation de la mécatronique en tant que concept architectural ? Cette culture de l'architecture en mouvement emploie la mécatronique comme moyen, mais rien n'indique que la mécatronique est effectivement ici génératrice de concepts. Nous avons pris un exemple singulier, mais les mêmes réflexions peuvent être faites concernant des systèmes plus communs tels que les ascenseurs, les portes automatiques ou les systèmes de ventilations mécaniques.

Cette génération de concepts par la mécatronique existe pourtant. La démocratisation des outils de prototypage rapide a provoqué l'apparition d'une pratique instrumentée de la conception revendiquant cette influence de l'outil sur la conception de l'ouvrage. L'on voit alors apparaître des approches théoriques sur la pratique de la mécatronique en conception architecturale. Nombre de projets à l'intersection avec le monde de la recherche sont apparus. Nous pouvons prendre pour exemple le cas de l'*Architectronic* qui comme son nom l'indique propose une convergence de concepts entre architecture et mécatronique (Meyboom et al., 2010). Ceci pousse d'ailleurs les concepteurs à figurer ces processus de conception (Figure 10). Nous indiquant ainsi le besoin d'outils de modélisation pour une maîtrise ces nouvelles pratiques, auquel notre recherche pourrait répondre.

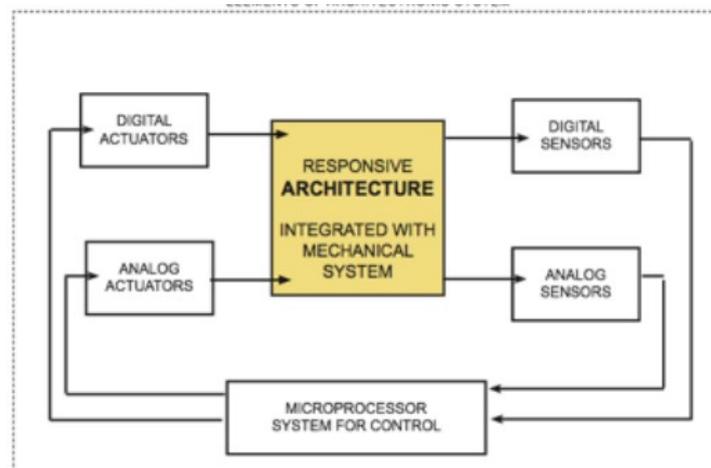


Figure 10 Architectronic control system diagram, 2009 (Meyboom et al., 2010)

Sans trop nous attarder sur les exemples d'Architectronique, nous pouvons néanmoins illustrer ce sujet avec la présentation de projets architecturaux fait à l'université de Varsovie. Un premier projet utilisant des capteurs de mouvement et des servo-moteurs a permis de concevoir un équipement urbain intelligent (Figure 11). Suivant le parcours des voitures, ce lampadaire serait prévu pour optimiser l'énergie nécessaire à l'éclairage et réduire les coûts d'infrastructure. Le deuxième projet est une membrane triangulée rétractable (Figure 12). Passant de deux à trois dimensions, elle transforme un élément de voirie en garage.



Figure 11 reCHARGE lamp – movable lamp post prototype. Par Paulina Kowalczyk, Ewa Szylberg, Krystian Kwiecinski, Radek Stach, Maciek Turski(Pasternak, 2012).

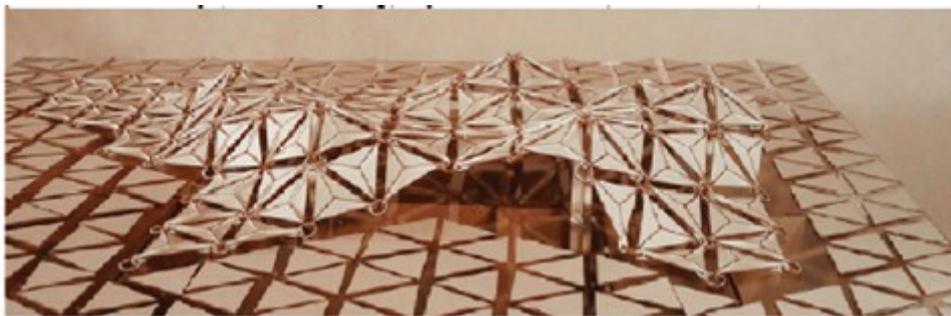


Figure 12 City Carpet project – roof structure prototype. Par Paulina Kowalczyk, Ewa Szylberg, Krystian Kwiecinski, Radek Stach, Maciek Turski(Pasternak, 2012).

2.3. L'architecte qui construit : l'idée d'un continuum numérique

Nous avons pu constater que l'idée d'habitat puis de ville machine s'est développée en suivant les progrès techniques, allant jusqu'à la production de concepts associant mécatronique et architecture. Poussé par le développement des outils de conception assistée par ordinateur, cette dynamique s'est prolongée jusqu'à l'idée de fabrication de l'architecture grâce aux technologies numériques.

Cette dynamique s'incarne aujourd'hui à travers de nombreuses productions à l'intersection entre projet de recherche et projet architectural. Nous ne pouvons toutes les citer, mais nous souhaitons présenter au moins le travail précurseur de Fabio Gramazio and Matthias Kohler à l'ETH de Zurich (Gramazio & Kohler, 2015), ainsi que le travail de d'EZCT avec le pôle Digital Knowledge de l'ENSA Paris Malaquais.

Les deux exemples de maçonnerie (Figure 13) sont le résultat d'un assemblage géré par des robots anthropomorphes et des drones (Figure 14). Il s'agit tant de performances artistiques que d'expérimentations architecturales. Elles permettent de faire un lien progressif entre processus de fabrication et processus de conception grâce au numérique



Figure 13 Exemples de maçonneries assemblées par des robots ; (g) *Gantenbein Vineyard Facade*, Fläsch, Suisse, 2006; (d) *Structural Oscillations*, Venise, 2007-2008, auteurs : Gramazio et Kohler (Gramazio & Kohler, 2015)



Figure 14 Exemples de systèmes d'assemblages de maçonneries robotisés ; (g) *Stratification*, UCL Bartlett, 2011 ; (d) *Flight assembled Architecture*, Frac d'Orlean, 2011, auteurs : Gramazio et Kohler (Brell-Cokcan & Braumann, 2013)

Tous ces travaux supposent que le maître d'œuvre s'approprie les modes constructifs en développant des concepts d'automatisation de la construction qu'il maîtrise grâce au numérique. On parle alors de *Continuum numérique* (Meyer, 2017). Il se crée alors tout un champ de la conception architecturale prenant la conception et la fabrication numérique comme support privilégié de la conception. Comme nous pouvons le voir (Figure 15) Il ne s'agit pas de simplement concevoir les outils mécatroniques, mais aussi de concevoir aussi les outils numériques supports des processus de conception. S'y ajoute un travail sur la géométrie et la matière fortement influencé par les outils de modélisation tridimensionnelles paramétriques.

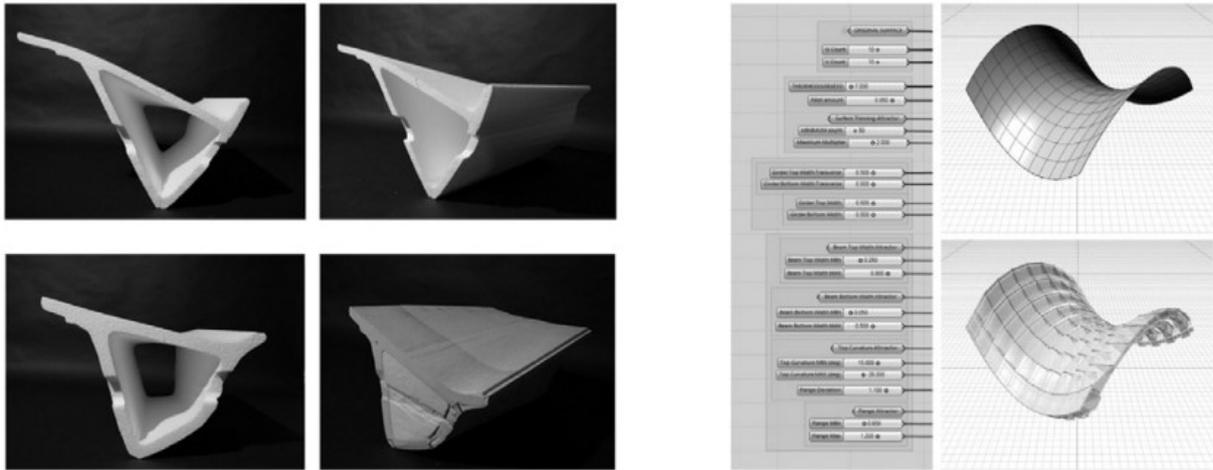


Figure 15 . Fisac Variations. (g): prototypes for the production of beams in EPS and concrete. (d) parametric model to study the configuration of beams on a surface. Credits: Felix Raspall, Matías Imbern et Will Choi (Raspall, 2015).

Les technologies numériques et la géométrie ne sont pas les seules sources de ce développement de concepts. Ces réflexions permettent avant tout la production de formes complexes et poussent l'architecture vers d'autres champs. C'est par exemple le cas de la biomimétique que l'on retrouve dans le travail d'Achim Menges. Il produit régulièrement des pavillons s'inspirant de modèles de structures présents dans la nature. Ces pavillons sont réalisés via des dispositifs de robotique produits sur mesure pour chacun des projets (Figure 16). L'idée de continuum numérique passe ici à un autre niveau, car il considère la reproduction des modèles du vivant à travers le numérique.



Figure 16 ICD/ITKE Research Pavilion, Universität de Stuttgart 2012 (Knippers & Menges, 2014)

2.4. La fabrication additive pour concevoir et construire

La fabrication additive, plus communément appelée Impression 3D, génère des voies d'expérimentations dans le champ de l'architecture. Celles-ci sont à la frontière entre conception et construction. Ces initiatives ne sont pas toujours portées par des architectes et vont au-delà de la production de modèles pour communiquer. Nous allons le voir à travers des exemples de projets de fabrication additive de grande échelle où l'expérimentation formelle tient lieu de réflexion vers la construction.

Parmi les premiers systèmes connus, la D-shape, apparue en 2004, est un robot cartésien imprimant en 3d par dépôt et solidification sélective de mélanges argilo-calcaires (Figure 17). Cette machine reprend globalement les techniques de fabrication additive existantes à cette période. Ce qui la lie naturellement à la construction sont les matériaux employés, et surtout la taille d'impression permise par son portique de 6m³. L'exemple présenté (Figure 18) est un double anneau de Moebius ne comprenant aucun élément de structure verticale. Ce bâtiment devant employer la D-Shape comme outil de fabrication n'est resté qu'à l'état de projet.



Figure 17 D-Shape- premières réalisations – 2004



Figure 18 Projet *Landscape House* présenté lors d'European 2012

En 2013, l'agence d'architecture Foster and Partners est missionnée par l'agence spatiale européenne pour imaginer la construction d'abris lunaires grâce à l'emploi de la D-Shape. Des images de synthèse des ouvrages sont réalisées (Figure 19), ainsi que d'autres formes d'outils s'éloignant des représentations habituelles des machines à commandes numériques (Figure 20). S'il est motivé par l'existence de la machine, le travail de conception architecturale ne s'y limite pas pour autant. Ce projet intègre des notions de conception architecturale plus traditionnelles, telles que l'habitabilité et l'esthétique.



Figure 19 - Image de synthèse représentant un abri lunaire construit par fabrication additive (Foster + Partners, 2013)



Figure 20 Proposition de système de fabrication additive lunaire par l'ESA (Foster + Partners, 2013)

L'impression par fixation se développe aussi en Allemagne, avec entreprise Voxel-jet qui imprime en 3D des éléments en silice de 3m par 4m et de longueur potentiellement infinie grâce à un plateau d'impression incliné. Parmi les réalisations faites à l'aide de cette machine on retrouve le projet de cloisonnement sur mesure de l'architecte François Brument (Figure 21). Ici la complexité de forme permis par la machine est mise en avant dans la conception. La fabrication additive est pensée comme une extension d'un travail de conception paramétrique de l'objet architectural.

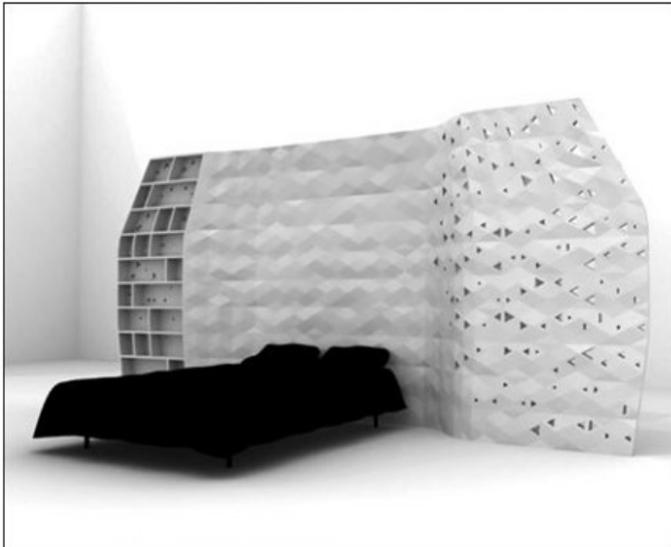


Figure 21 *L'habitat imprimé* - François Brument – 2013 / Imprimante VoxelJet

L'impression par fixation est un procédé lourd, ainsi se développent des machines à concrétion sur le modèle des imprimantes à dépôt de fil plastique (Figure 22). Ceci aboutit vers des projets de plus grande envergure, avec la fabrication d'éléments sur mesure pour la construction de la façade du bâtiment en exemple, situé à Amsterdam. Ce projet de l'agence d'architecture DUS propose de fabriquer des réceptacles par fabrication additive. Ces derniers sont ensuite remplis de béton.



Figure 22 Imprimante 3D plastique sur mesure / Printed canal house - DUS – 2013

Il ne s'agit pas du seul exemple d'utilisation de l'impression 3D comme élément de coffrage. Le projet BATIPRINT 3D en est un exemple, avec l'utilisation de mousse expansive déposée par couches successives (Figure 23). Ce procédé permet plus de flexibilité que l'impression directe de béton et conserve les propriétés de complexité des formes rendues possibles par la fabrication additive.



Figure 23 Réalisation de logements sociaux dans le cadre du projet BATIPRINT 3D (Furet, Poullain, & Garnier, 2019)

Enfin en 2014, l'entreprise MX3D propose la construction d'ouvrages d'arts en acier à l'aide d'une technique de fabrication additive employant un robot anthropomorphe (Figure 24). Ici encore la question de la modélisation paramétrique est posée. De plus ce projet suppose l'introduction de systèmes plus complexes que ceux permis par les robots cartésiens. La machine n'est plus pensée comme un objet fixe, elle se déplace au fur et à mesure de la construction.



Figure 24 Projet d'impression d'un pont métallique - MX3D - 2014 - Amsterdam

2.5. Mécatronique de conception : Un concept pour nommer ces pratiques

L'ensemble des projets observés restent dans le champ de l'architecture. Mais cet aspect de la mécatronique n'est pas propre à l'architecture. De plus des propositions fortes sont faites en faveur d'une projection de ces techniques vers le monde de la construction. Elles restent malgré tout à l'état de concepts ou de prototypes.

Cette prééminence de la conception dans ces approches de la mécatronique nous a mené à penser qu'elle pouvait être définie comme tel. Lors d'un précédent travail de recherche nous avons alors proposé le terme de « Mécatronique de conception » (Zedin, 2012).

La mécatronique de conception s'observe donc à travers des pratiques à l'intérieur d'un milieu où la conception est une des prérogatives. Cette pratique a pour vocation l'expérimentation et la communication du projet. Elle permet le développement de concepts architecturaux comme la complexité des formes, l'automatisation de la construction. Elle permet aussi leur transfert vers des modes de fabrication concrets ou encore en maturation.

S'il est clair que la notion de robotique a mené certains architectes à produire des éléments bâtis, c'est le cheminement de leur pensée et leur rapport à la technique qui nous intéressent. Lorsque la mécatronique est perçue comme un outil de prototypage, d'expérimentation. Ceci semble permettre de modifier le rapport à la construction. Il ne s'agit plus de s'adapter et se conformer aux méthodes existantes pour construire. Cette dynamique se distingue d'une autre, propre au monde de la construction qui se concentre sur la notion de « Robotique de construction » ou « Mécatronique de construction » (Arai, 2011). Nous allons exposer ce champ pour voir ce qui le caractérise.

3. La mécatronique de construction

3.1. Origines de la mécatronique de construction

Nous l'avons vu, la mécatronique inspire des utopies d'architectes. Ceux-ci invoquant parfois des métaphores ou de la fiction et parfois la technologie ou le progrès technique. Certains tendent vers une réalité constructive par des projets manifestes, par des enseignements et de l'expérimentation. Mais quel est l'état actuel de la mécatronique dans le monde de la construction ? Nous pourrions considérer que la mécatronique de construction est une composante de la mécatronique en architecture, or elle n'implique aujourd'hui que peu d'architectes.

Comme pour le monde de l'architecture, le mot mécatronique n'est pas toujours mis en avant dans celui de la robotique de construction. Il est toutefois beaucoup plus assumé car il est concrètement employé lors de la conception de ces objets (Arai, 2011). La mécatronique de construction est un champ de la robotique industrielle. Elle s'en détache néanmoins car l'histoire de son développement et ses applications la démarquent. Son développement s'est fait d'abord au Japon puis en Europe et constitue un champ de recherche très vaste. Dans les années 70, suite au développement du marché immobilier au Japon, la robotique apparaît d'abord sur les chantiers pour appuyer la politique productiviste du pays (Hasegawa, 1991). L'objectif de conserver les capitaux de l'industrie de la construction à l'intérieur du pays, couplé à celui de raccourcir la moyenne d'âge du parc immobilier japonais à 20 ans pousse le gouvernement à subventionner les grandes entreprises de construction (Kato, 1988). On constate un ralentissement de ce développement au cours des années 90 (Salagnac & Peyret, 1993). La robotique de chantier n'a

donc pas évolué depuis ces années, et l'on en retrouve quelques vestiges dans la documentation sur la construction de l'époque (Figure 25), mais aussi à travers quelques exemples arrivés jusqu'à nous et présents sur les chantiers.

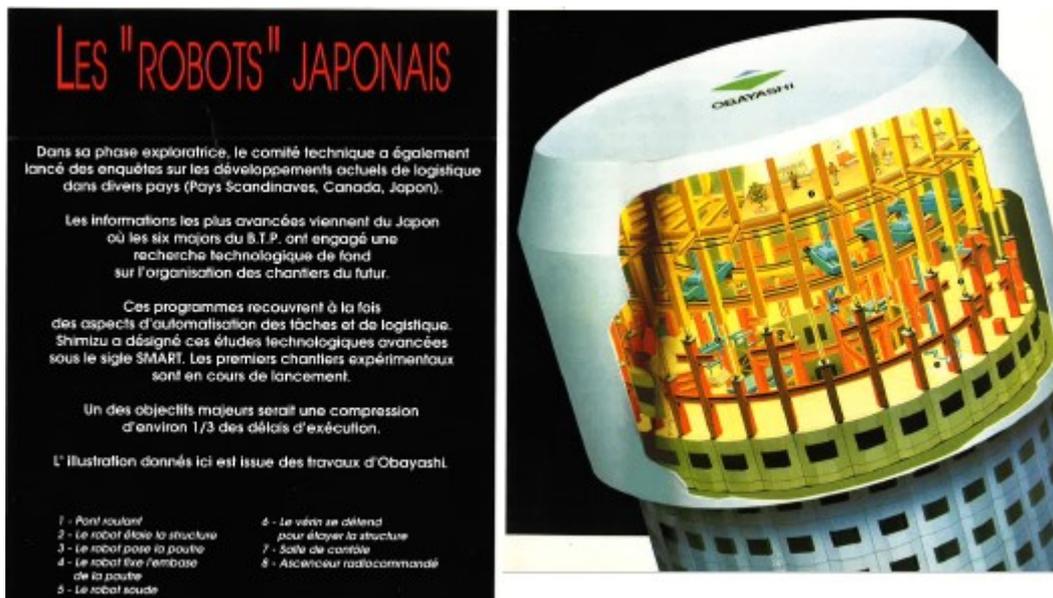


Figure 25 *Les robots japonais*. Extrait du journal d'entreprise *InterDumez*, Section Qualité Innovation, 1993.

3.2. Un domaine de recherche international et interdisciplinaire.

La recherche dans le domaine de la robotique de construction est portée par l'IAARC (International Association for Automation and Robotics in Construction). L'IAARC existe depuis les années 80 et organise des conférences annuelles depuis 1984, avec un premier symposium en 1986 à Marseille (I.A.A.R.C., 2016). Nous aurons l'occasion d'observer la mécatronique de construction à travers les multiples publications conservées par l'IAARC. Certaines évoquent d'ailleurs notre objet de recherche car les processus de conception sont un enjeu du développement de ce secteur encore jeune.

Si au premier abord l'objet de cette association semble très cloisonné, il n'en est rien. La liste des domaines concernés par la robotique et l'automatisation dans la construction est longue : CAO, modélisation, systèmes experts, gestion de données et architecture systèmes ; Simulations, logiciels d'ingénierie, modélisation des données ; Robotique, métrologie, logistique, inspection automatisée, démolition ; Maintenance, systèmes d'informations, systèmes de contrôles. Cette liste s'allonge au gré des nouveaux domaines que le numérique permet de générer dans la construction.

3.3. La robotique de construction en France

En France, le développement commence en 1984 (Salagnac, 1991). La France propose des projets par l'intermédiaire du CSTB jusque dans les années 90. François Peyret et Jean-Luc Salagnac sont alors des figures de la recherche dans ce domaine et publient dans les symposiums de l'IAARC. Cette activité nous permet d'observer les projets en France et leurs spécificités. Le Japon compte plutôt sur un développement par les entreprises de BTP. C'est aussi le cas en France, mais ses projets de robotique de construction sont proches de la recherche et de l'expérimentation. Nous en retrouvons

une liste établie en 1991 (Figure 26). Pour l'illustrer nous proposons de nous pencher sur l'un de ces projets : le projet SOFFITO

6. FRANCE

* The information of No. 1, 5, 6, 8, 9, 10, 11 & 12 is described in details in:
"Robotics in Construction: projects and perspectives", Cahier du CSTB, No. 2412, May 1990, Paris, CSTB, 1990

No	Organization	Theme	Period	Output
1	CSTB IIRIAM AID	SOFFITO Mobile robot for finishing work	'85 - '87	First experimental mobile robot for building operations in Europe
2	POTAIN SOGEA	EURO 9 Automated tower crane	'87 - '91	New product on the market
3	POTAIN CBC	ATLAS Large scale manipulator for building construction	'90 - '93	
4	POTAIN GIM	Automated gripper for crane handling	'90 - '92	
5	CYBERNETIX	''	'88 - '89	Specifications
6	CEBTP	LEZARD Inspection of vertical surfaces	'88 - '89	Robot in operation
7	DUEZ	ARTEMIS Automated process for building construction	'88 - '92	Buildings already produced
8	LCPC ENSM CYBERG BJL	SIREM Positioning system	'89 - '91	Potential use for automated road construction
9	MICROMAINE LCPC	SIRRAH DISTER Positioning systems	'87 - '89	Commercial products
10	CSTB MICROMAINE	Laser positioning system for site applications	'88 - '91	Experimentation on site
11	CBC MIDI-ROBOTS	Positioning system using hyperfrequency signals	'88 - '89	Prototype
12	BONNA SAE, et al.	IUI Prefabricated concrete urban network with built robotized inspection	'85 - '90	New design of technical gallery

Figure 26 Liste des projets de robotique de construction référencés par le CSTB en 1990 (Hasegawa, 1991)

SOFFITO – Un exemple de la robotique de construction en France

En 1985 « le CSTB, conjointement avec l'IIRIAM et la Société AID, travaille à la réalisation d'une maquette expérimentale de robot de second œuvre de bâtiment baptisée SOFFITO »

« Outre les stricts objectifs expérimentaux, de telles actions ont pour but de sensibiliser les entreprises de construction et les fabricants de matériel de chantier aux possibilités ouvertes par ces développements.»(Rubinstein & Salagnac, 1986)

Le projet Soffito permet de tester la mise en œuvre de robots mobiles sur des environnements de chantier (Figure 27, Figure 28 et Figure 29). Différentes techniques venant du monde de la robotique sont expérimentées, comme le positionnement grâce à des capteurs à ultrason ou la modélisation de cellules et d'aires de travail (Figure 30, Figure 31 et Figure 32).

Evolution des dispositifs SOFFITO

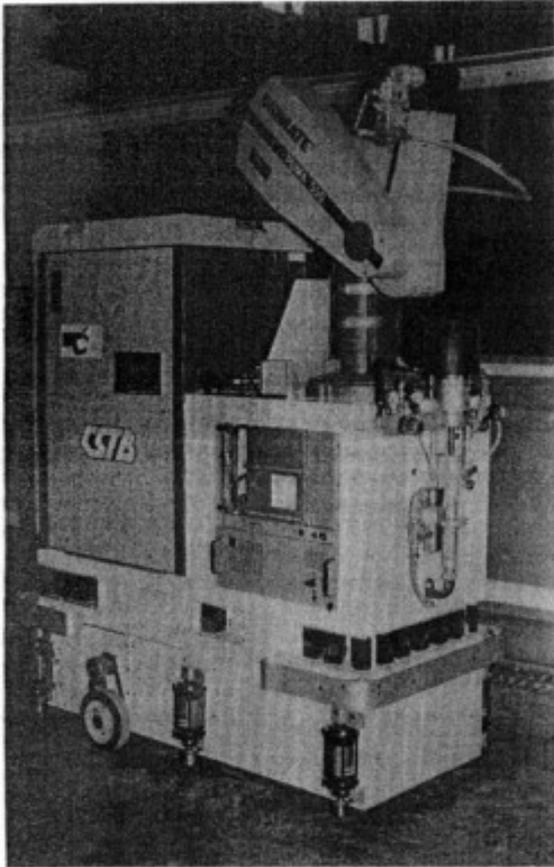


Figure 27 Dispositif expérimental SOFFITO en 1988(Salagnac, Gallais, & Chevalaz, 1988)

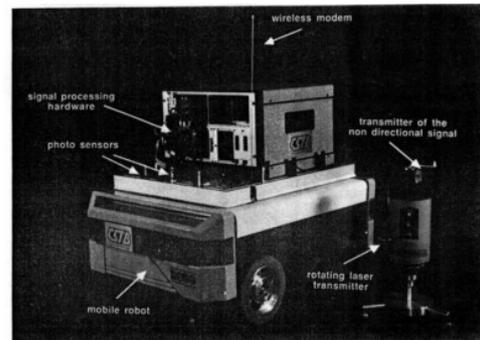


Figure 28 Dispositif expérimental SOFFITO en 1989 (Salagnac, 1989)

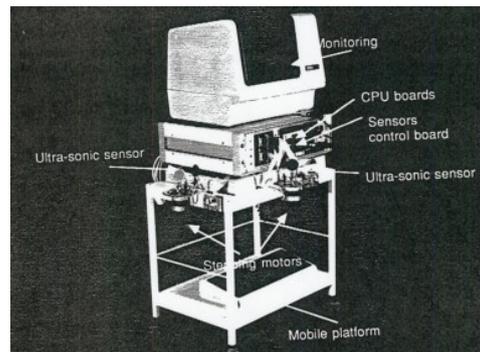


Figure 29 Vue du dispositif expérimental SOFFITO en 1990 (Salagnac, Vinot, & Pujol, 1990)

Evolution des principes de déplacements de SOFFITO

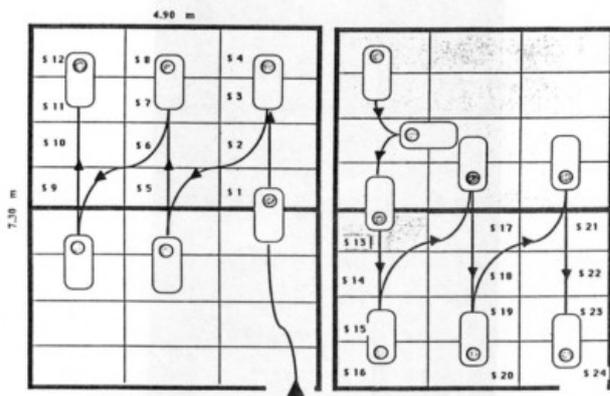


Figure 30 Principe de fonctionnement de SOFFITO en 1988 (Salagnac et al., 1988)

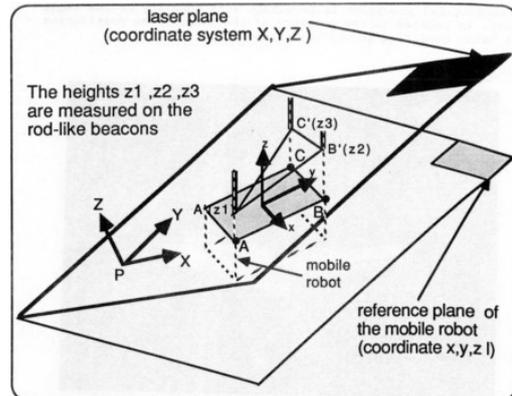


Figure 31 Principe de fonctionnement de SOFFITO en 1989 (Salagnac, 1989)

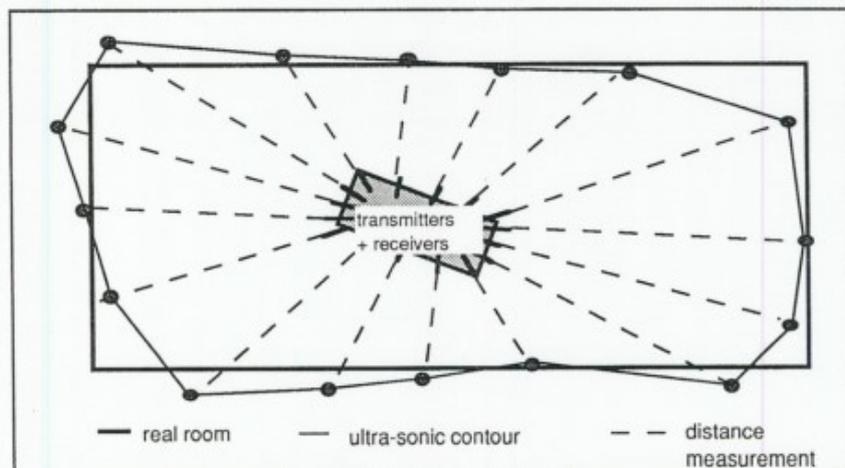


Figure 32 Principe de fonctionnement SOFFITO en 1990 (Salagnac et al., 1990)

La fin d'une dynamique

Très rapidement ce champ de recherche et développement disparaît de notre territoire. Il n'est plus soutenu par les pouvoirs publics, et n'a jamais réellement intégré l'industrie de la construction. Ces projets portés par le CSTB ont sûrement apporté beaucoup au monde de la mécatronique et de la robotique mais restent inconnus du monde de la construction. Nous pouvons retrouver des traces de ce phénomène d'extinction (Figure 33). Mais il n'existe pas de rapports expliquant les motivations de l'arrêt de ce développement.



Figure 33 Extrait de CSTB magazine (Salagnac & Peyret, 1993)

3.4. La mécatronique de construction à travers ses applications

Pour compléter ce portrait de la mécatronique de construction, nous allons passer en revue les exemples de machines ayant existé à la fin du XXème siècle. Pour ce faire, nous nous appuyons sur l'ouvrage *Robot and automated machines in construction* (IAARC, 1998). Les exemples présentés sont classés par domaines d'applications correspondant aux différents corps d'états présents dans le monde de la construction. Ces figures sont importantes car elles constituent un formidable support de réflexion et de compréhension des logiques de conception de la mécatronique de construction. Leurs processus de conception ne sont pas décrits, mais les fonctions ainsi que les représentations de ces machines nous donnent des indices sur les espaces de référence de leurs concepteurs.

Démolition

Commençons par une machine familière du monde de la démolition (Figure 34). Ces machines ont une base mobile sur laquelle est posé un bras mécanisé au bout duquel est placé un outil de démolition. La mécatronique n'est pas ici faite pour automatiser son travail, mais pour permettre son contrôle à distance. Plusieurs modèles existent ; Leur taille varie et des systèmes de changement d'outils ont été développés pour s'adapter à toutes les configurations de chantier.

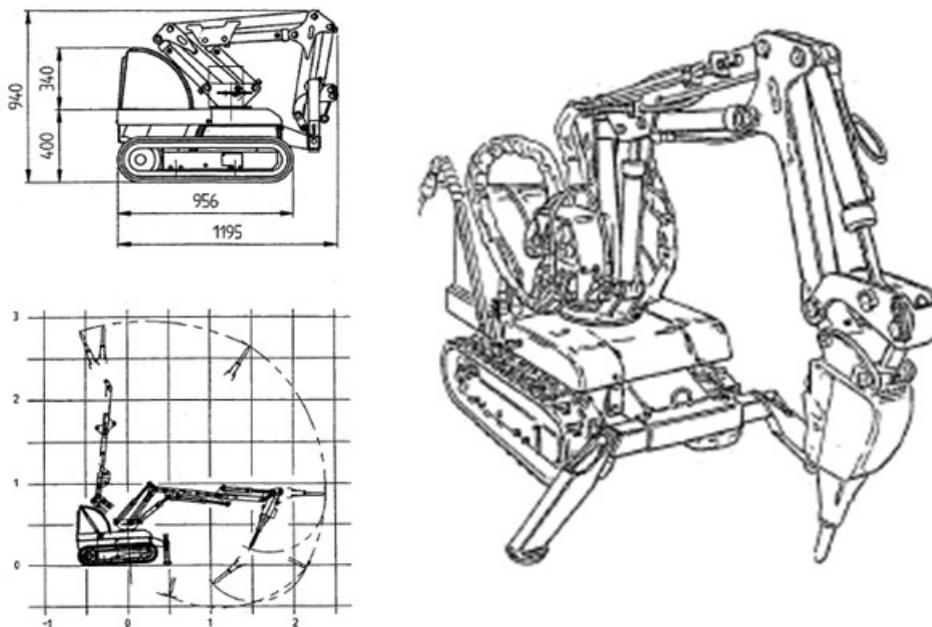


Figure 34 Demolition units: BROKK – Holmhed systems AB

Les méthodes de démolition par fissuration hydraulique sont de moins en moins utilisées de nos jours à cause de leur aspect polluant. Elles furent néanmoins courantes dans le monde de la construction. Il est donc normal de trouver des engins robotisés reprenant ce principe pour la démolition d'éléments de maçonnerie verticaux et horizontaux. Le passage vers la mécatronique se fait par l'introduction d'axes linéaires contrôlés par ordinateurs (Figure 35). Ceci permet avant tout d'automatiser ces tâches chronophages et de maintenir le personnel à distance de la zone de

démolition (Figure 36). Cette automatisation de tâches a progressivement permis d'intervenir sur des ouvrages difficiles d'accès (Figure 37 & Figure 38).

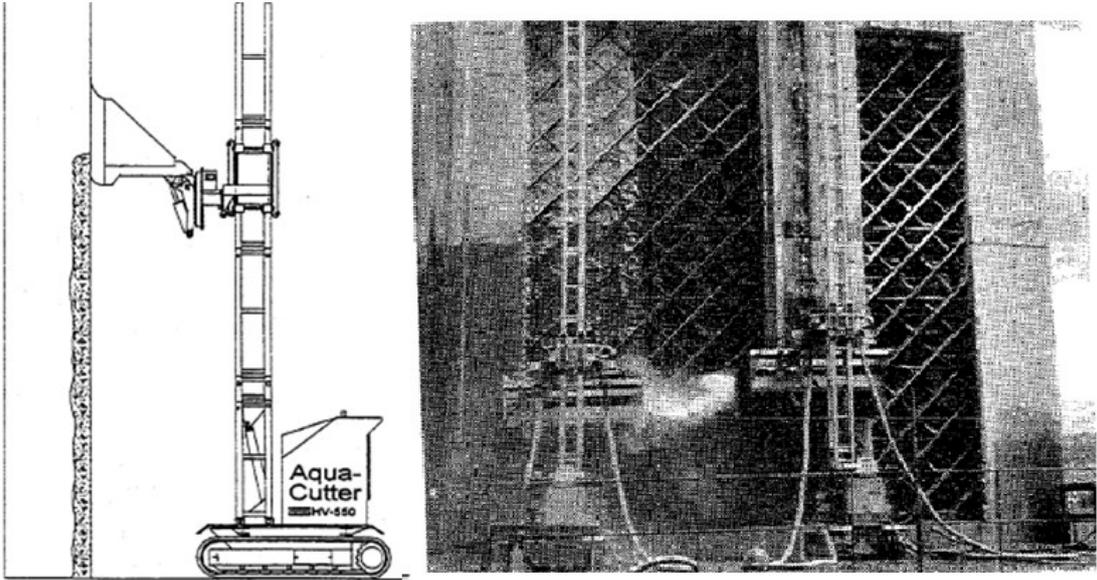


Figure 35 Concrete Hydrodemolition Robot – WOMA Apparatebau GMBH

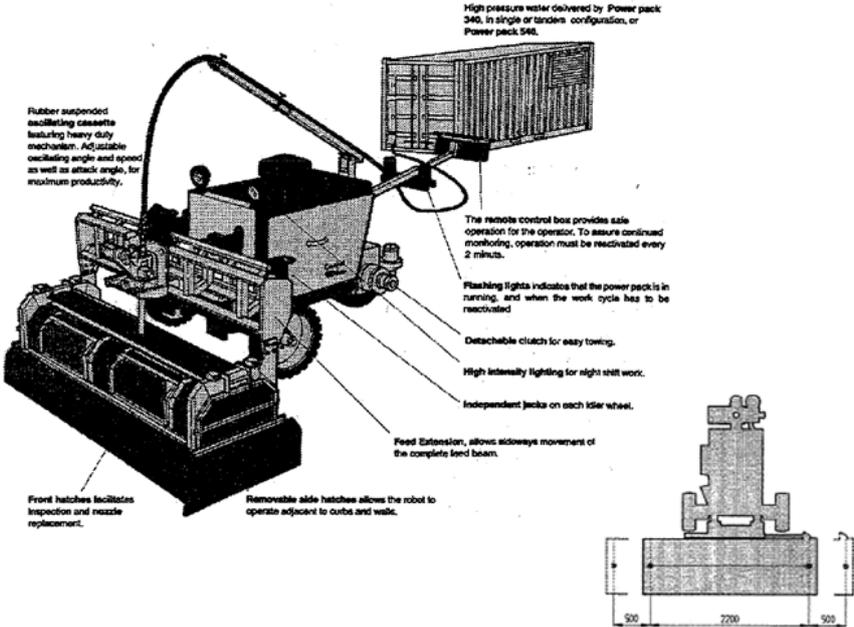


Figure 36 Conjet Jetframe system for hydrodemolition – Conjet AB

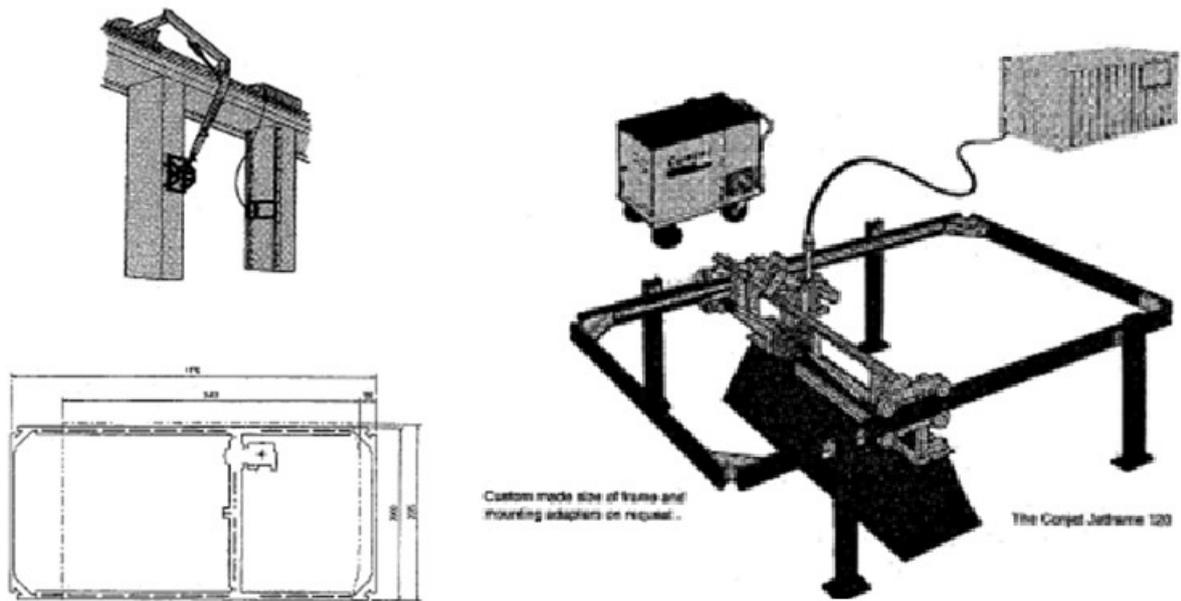


Figure 37 Conjet Jetframe system for hydrodemolition – Conjet AB - adaptations

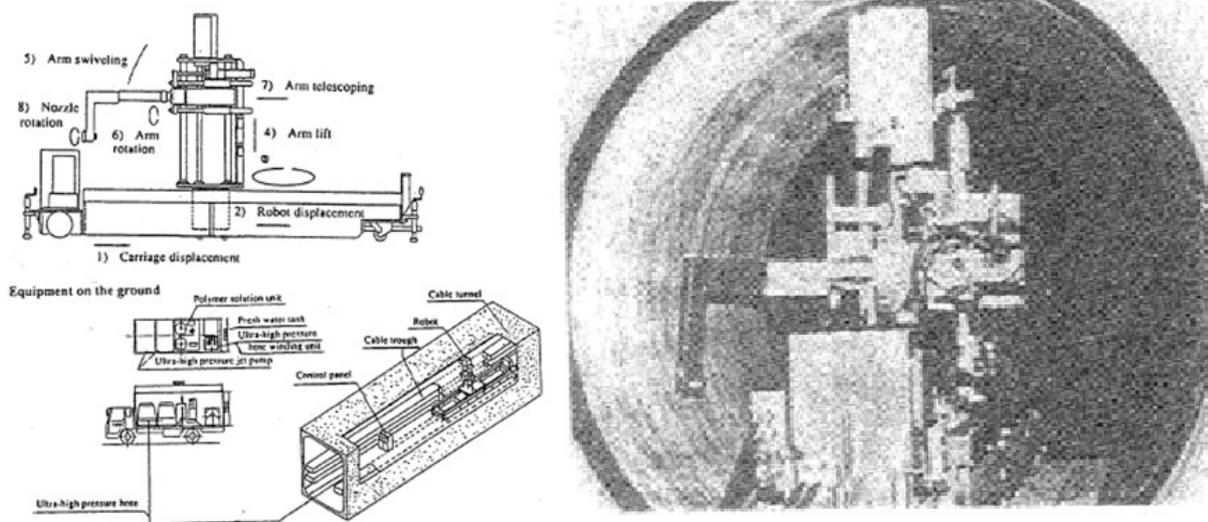


Figure 38 Water-Jet Chipping Robot – Kumagai Gumi

Excavation

La gestion à distance d'engins de chantier est très adaptée aux travaux d'excavation. L'automatisation de certaines tâches comme l'enlèvement des terres et leur déchargement permet de gérer des travaux complexes avec un seul opérateur (Figure 39). Ici l'opérateur a pour seule tâche la surveillance du bon déroulement de chaque phase d'excavation pour l'insertion d'un caisson (Figure 40). On voit le détail des équipements de contrôle comprenant les éléments de robotique et l'interface de l'opérateur (Figure 41).

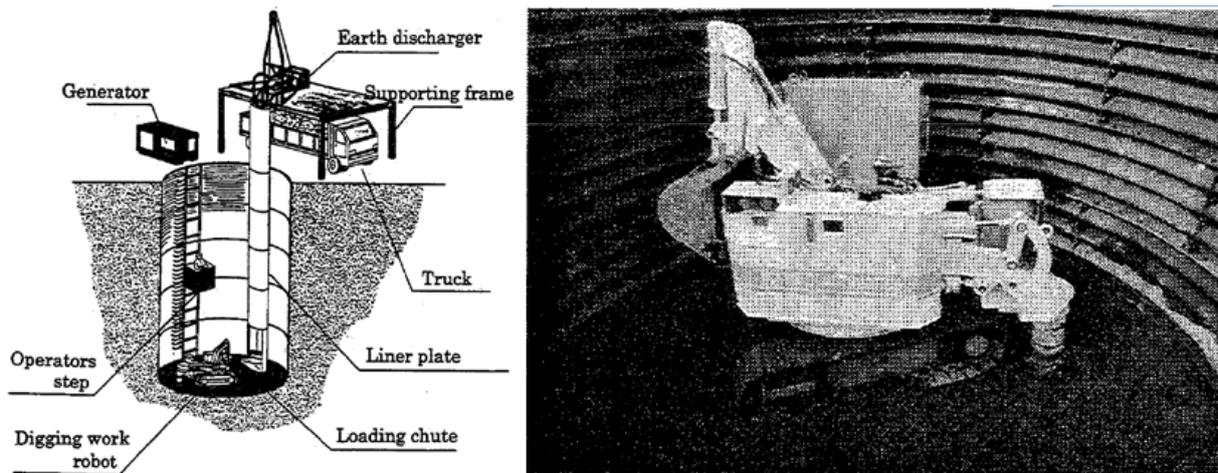


Figure 39 Digging Work Robot - Tokyu Construction – 1989

Voirie

Le travail sur les voiries est souvent répétitif. Des engins de dépose ou de traitement de l'asphalte existent aujourd'hui dans le monde entier. Ils rentrent dans la catégorie mécatronique de construction car le contrôle et l'automatisation de chaque tâche a nécessité l'introduction de cette technologie. Le développement a commencé au Japon, mais pour le marché européen ces engins viennent le plus souvent de l'Allemagne et de la Suède (Figure 42 & Figure 43).

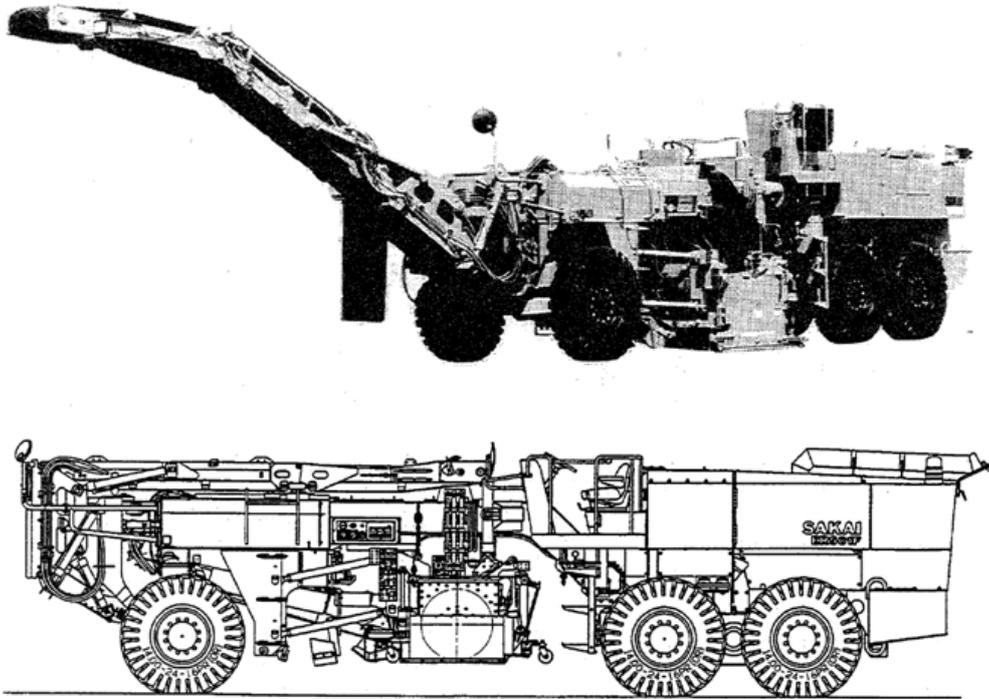


Figure 42 Road Profile Cutter Er501F – Sakai Heavy Industries, Ltd

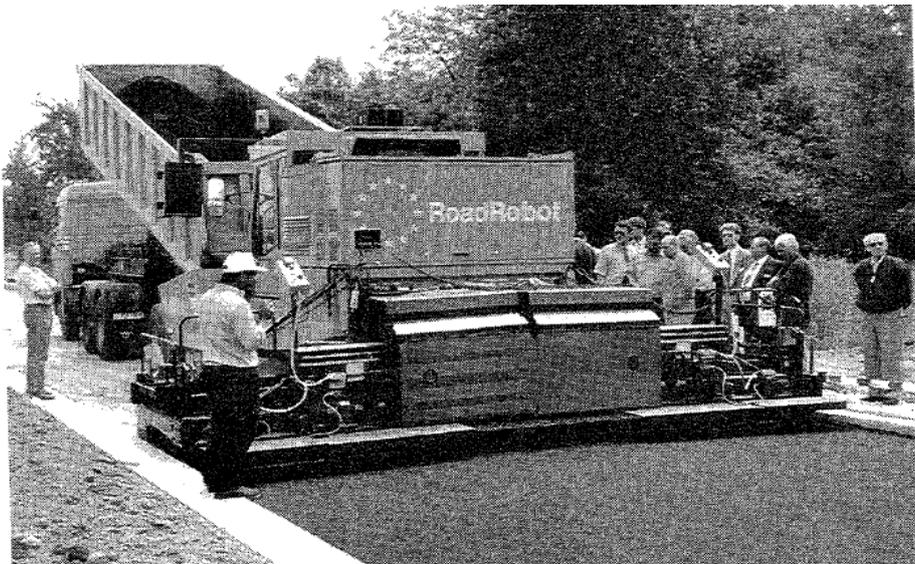


Figure 43 Road Robot – Fully Automatic Road Paver – Joseph Vögele AG

Fabrication de tunnels

Les travaux de construction sur les tunnels sont l'occasion de faire des économies d'échelle et rentabiliser le développement de certains équipements. Comme l'appareil présenté (en Figure 44) adapté sur un rail et muni d'un outil pour des reprises sur les voutes en béton. Le même type d'équipement se retrouve pour les tunnels autoroutiers (Figure 45). Les systèmes automatisés de percement de tunnel sont aujourd'hui de plus en plus développés (Figure 46). Ces travaux sont aujourd'hui polyfonctionnels, allant de l'étude de sol à la pose des éléments de consolidation.

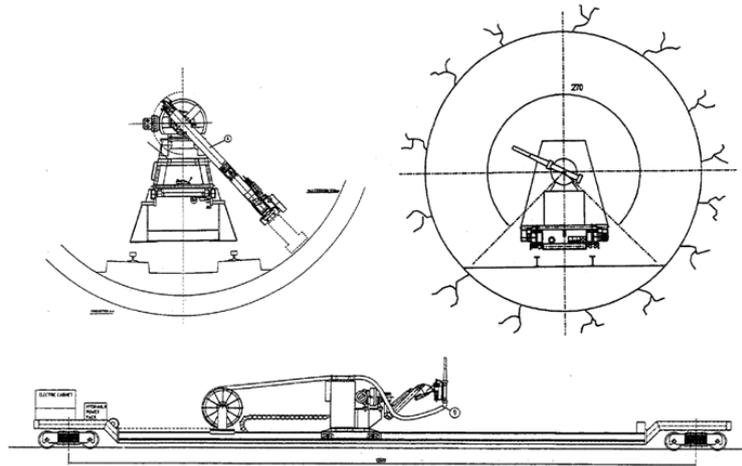


Figure 44 Stabilator Tunnel Lining Repair system – Stabilator AB

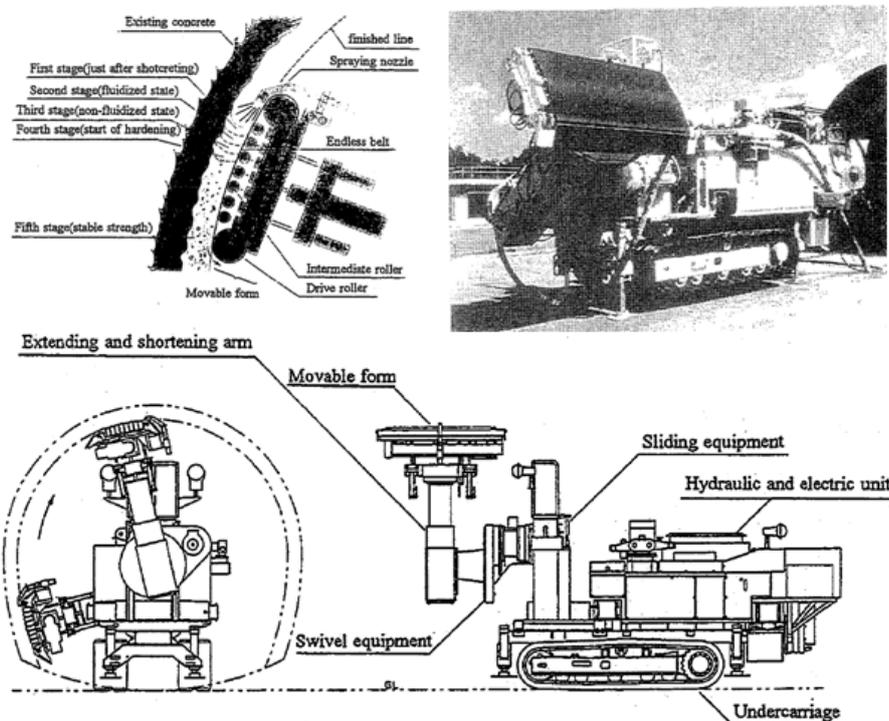


Figure 45 Tunnel Swift Lining Robot – Tekken Corp

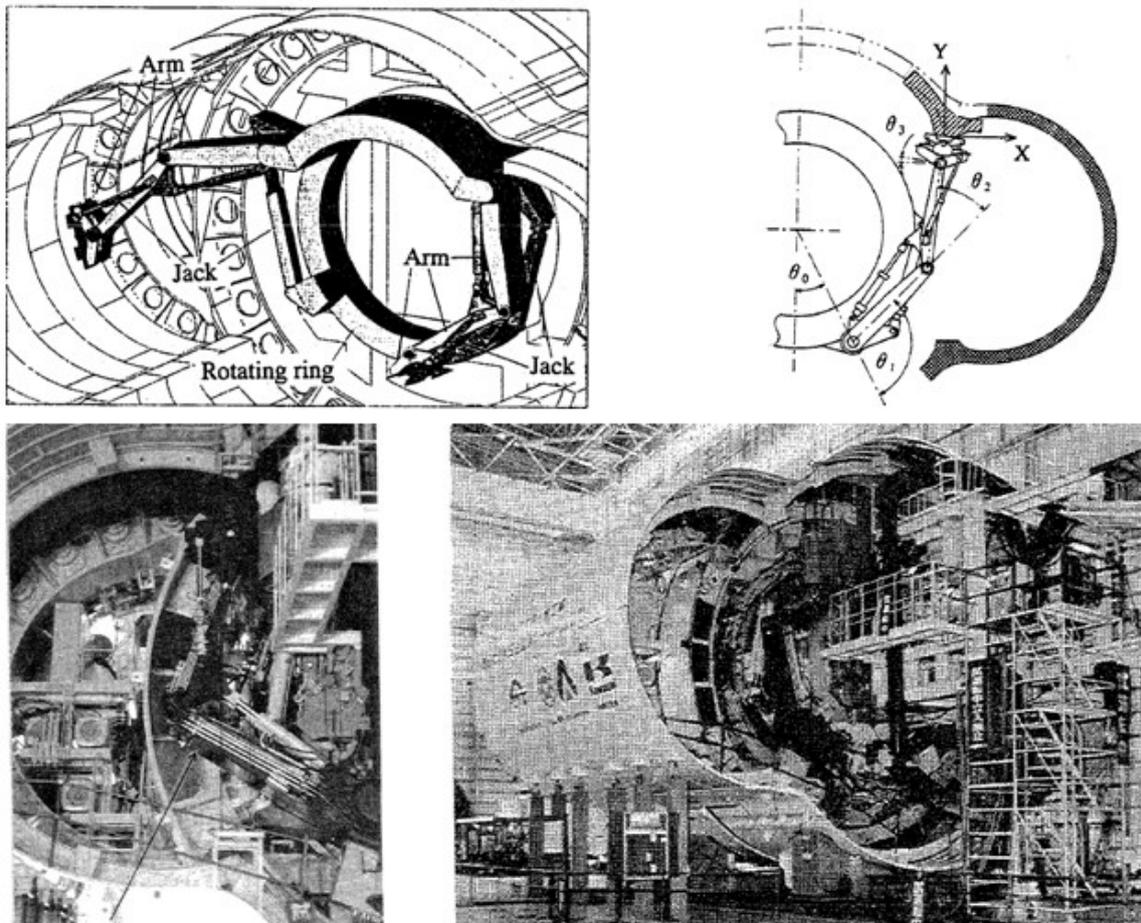


Figure 46 Multi-jointed Arm Erector – Kawasaki Heavy Industries

La distribution de béton

Les engins tels que le Putzmeister sont très connus dans le monde de la construction (Figure 47). La mécatronique de construction a donc déjà intégré les chantiers de bâtiment. D'autres systèmes moins connus existent. Par exemple pour la distribution locale de béton lors la fabrication de dalles. Elles assurent la bonne répartition du béton lors du coulage. Placé sur un rail, et un axe de rotation cette machine (Figure 48) a une portée moyenne 11m par 8m. Des systèmes automatisés de grue permettent d'assurer l'approvisionnement du béton sur les chantiers en hauteur (Figure 49). Ainsi aucun opérateur n'est requis pour assurer les cadences de production.

Ces réflexions se sont étendues à la fabrication complète d'ouvrage. Depuis 1987 l'ensemble des cheminées de centrales thermiques du japon a été réalisé avec un système de coffrages glissants et de montage de grues en pantographe (Figure 50). La construction complète est gérée par un seul opérateur. La construction des piliers de ponts et certaines tours ont repris le même système.

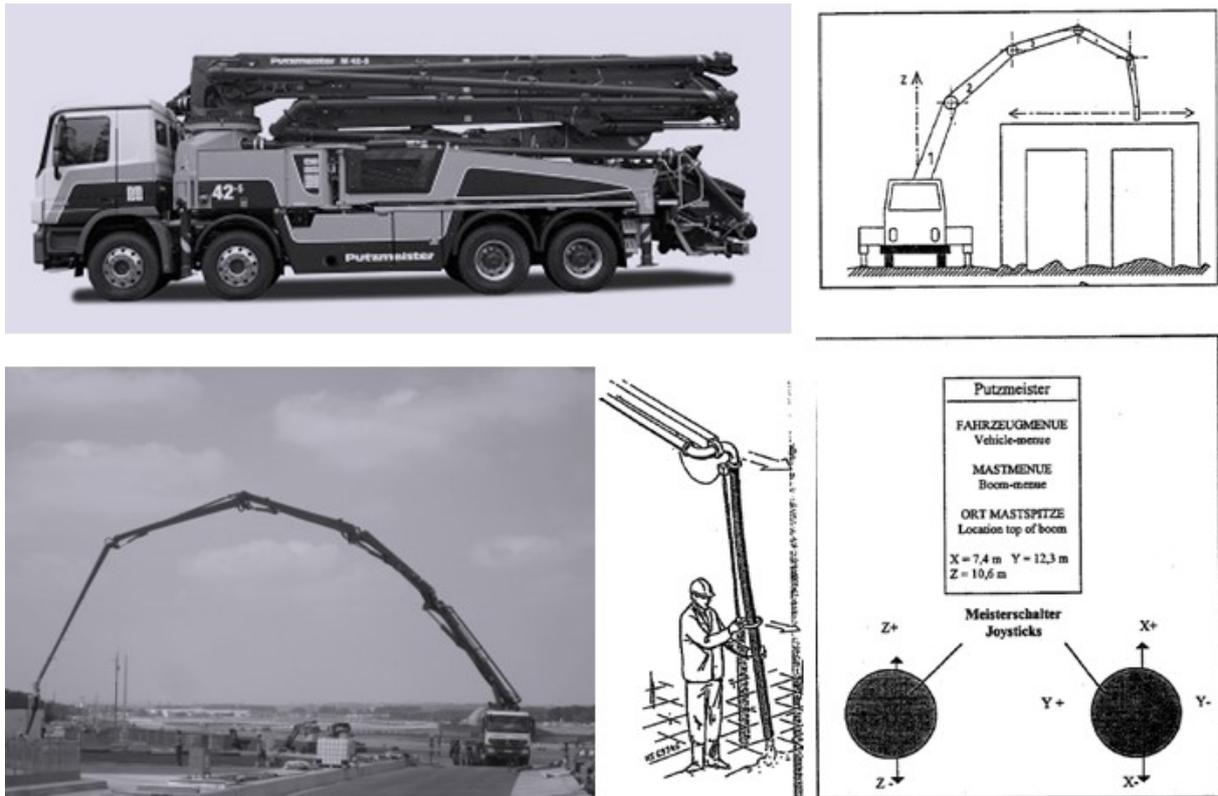


Figure 47 Computer Controlled Mobile Concrete Distributor – Putzmeister

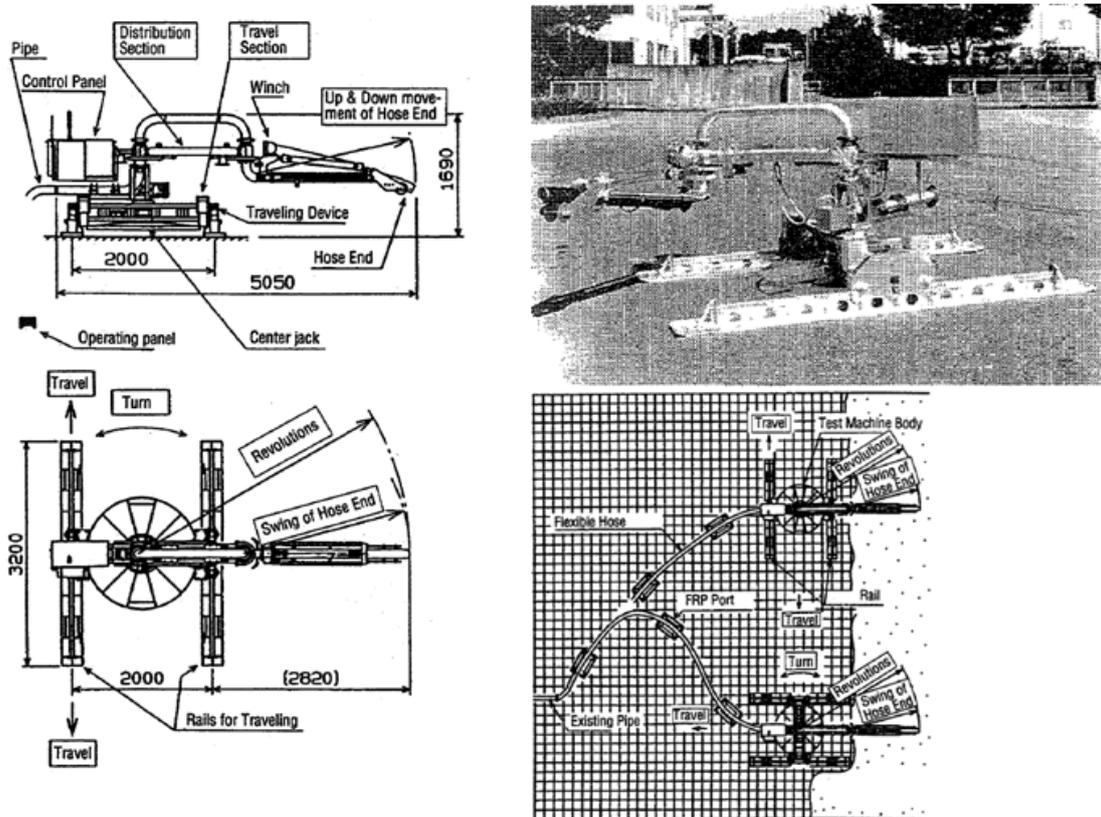


Figure 48 Simplified Distributor DB ROBO – Tanekaka

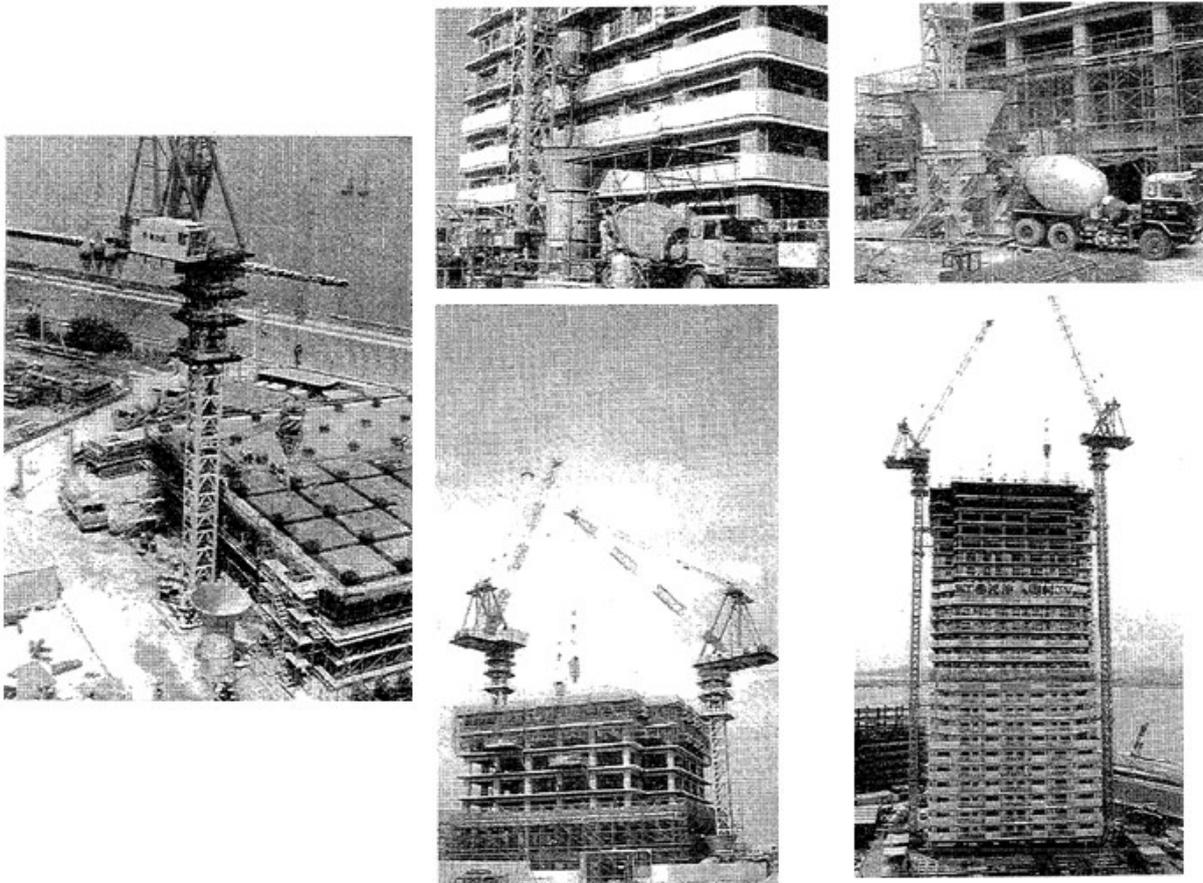


Figure 49 Automatic Concrete distribution system with Tower Crane – Konoike construction – 1989

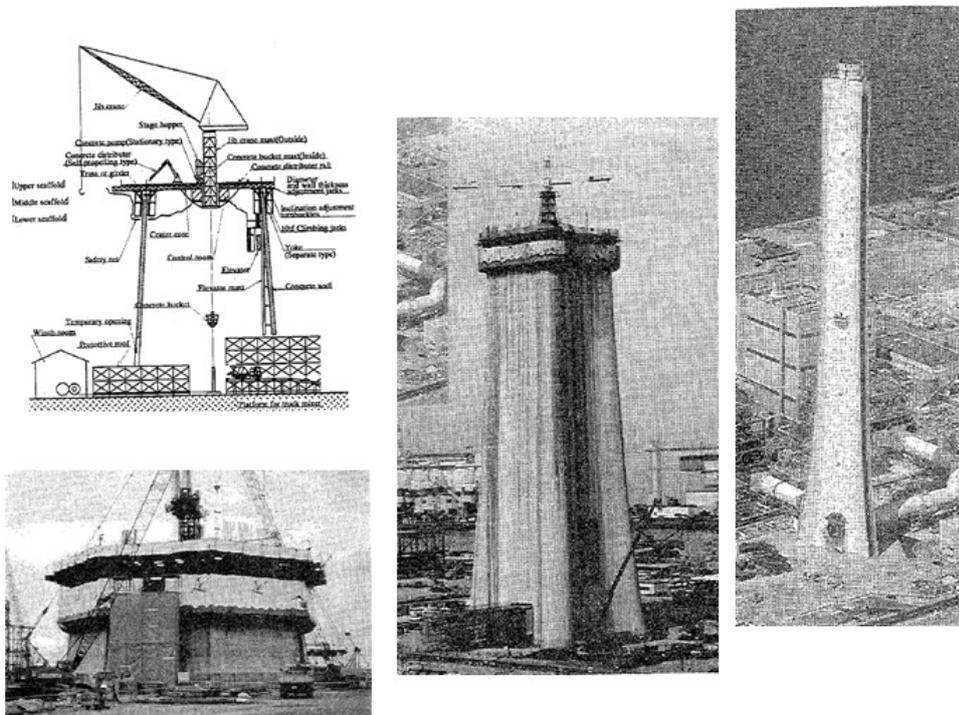


Figure 50 Toboshima Auto-level Pantograph Slipform – Tobishima corp -1987

Traitement de surface

Sur des grandes surfaces il peut être intéressant d'automatiser le lissage des chapes. Le robot parallèle présenté (Figure 51) assure la pose et le contrôle du niveau. Mais ces systèmes sont peu adaptés aux chantiers dont la typologie change pour chaque projet. Les déplacements du robot de lissage de béton (Figure 52) sont entièrement automatisés. Ce système de déplacement est le même que celui que l'on retrouve pour les robots aspirateurs aujourd'hui. Plusieurs prototypes furent créés, nous permettant de comprendre les étapes de conceptions qui leurs ont permis d'émerger (Tanaka et al., 1986). Il existe des systèmes où la gestion des déplacements est moins importante que la gestion des tâches. Par exemple pour l'automatisation des truelles mécaniques (Figure 53).

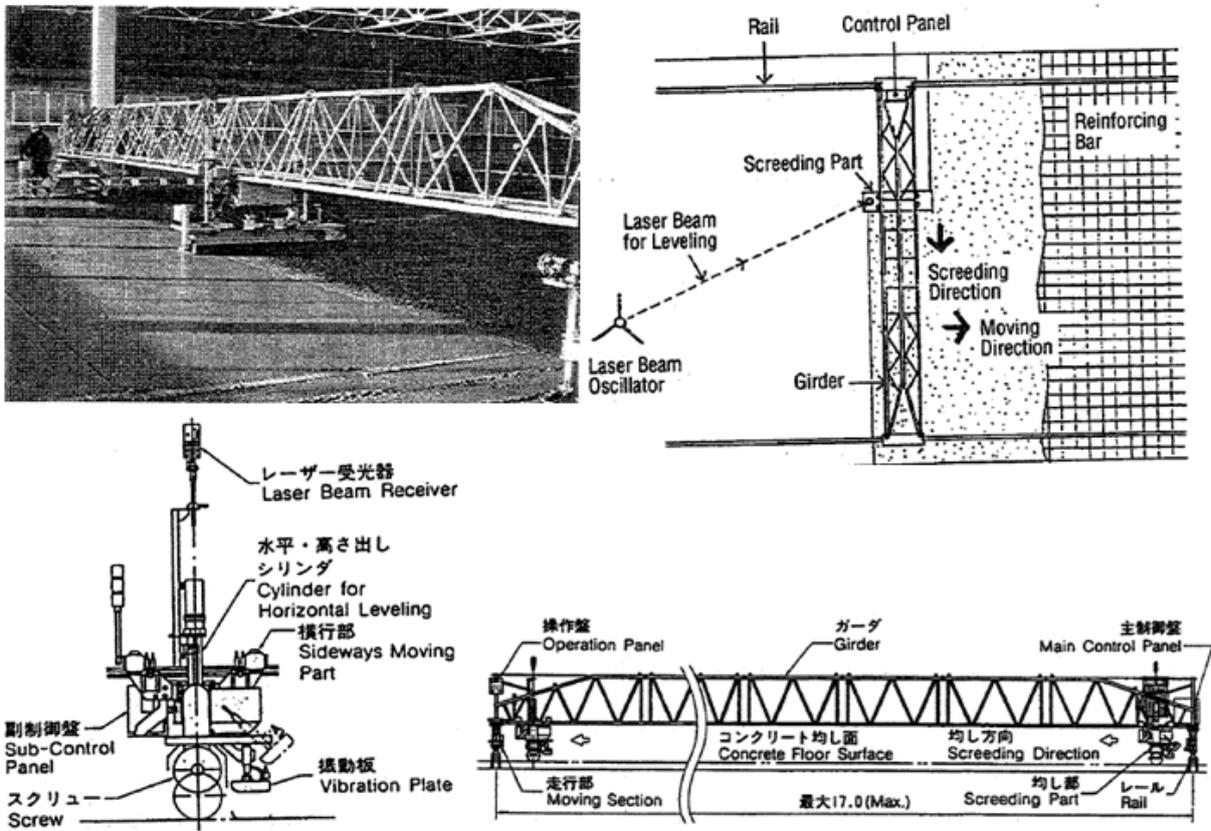


Figure 51 Concrete Floor Screeding Robot– Takenaka corp

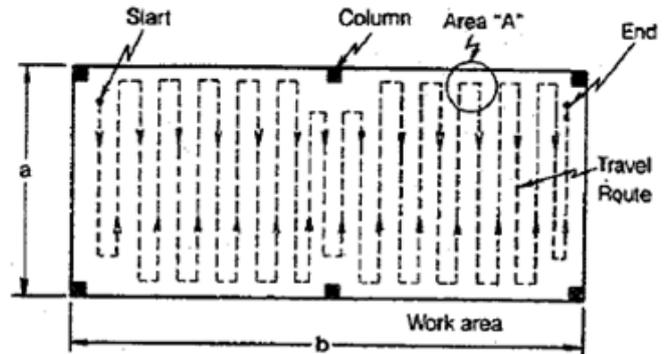
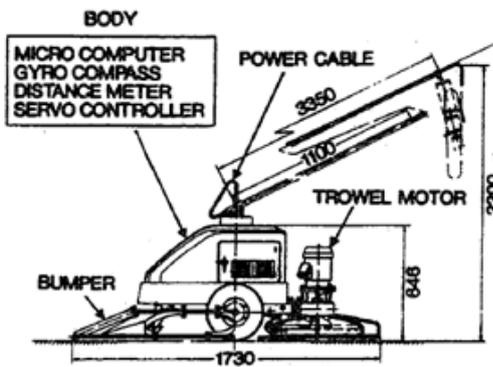
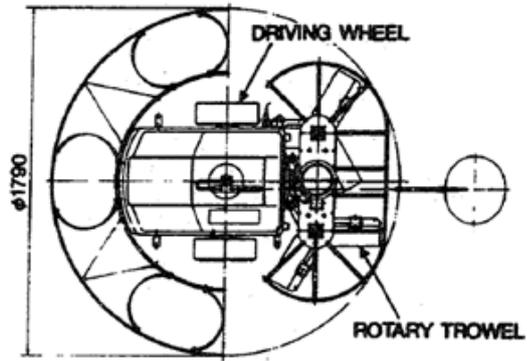


Figure 52 Concrete-slab Finishing Robot– Kajima corp

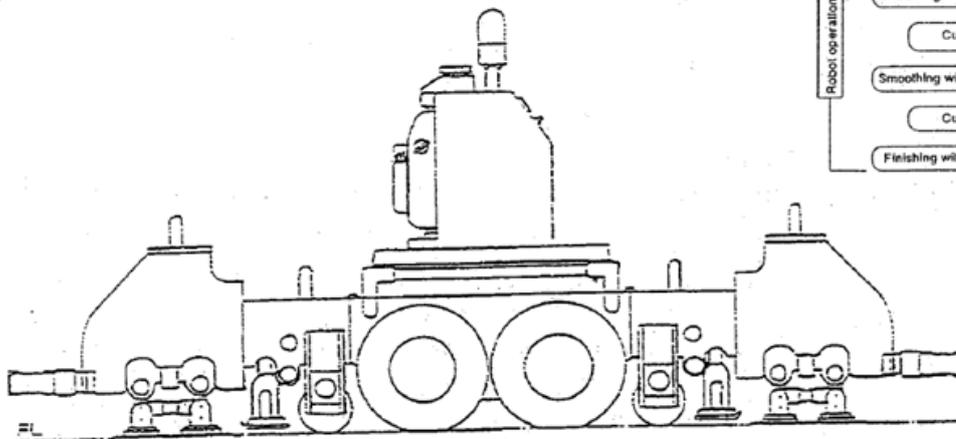
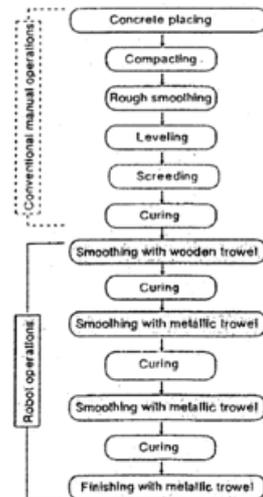
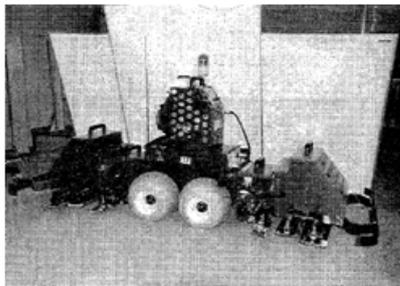


Figure 53 Floor troweling Robot– Hazama corp

Manutention et logistique sur site

La logistique a aussi son importance sur les chantiers. Les systèmes robotisés ou d'automatisation de lifts et de transport de matériel peuvent éviter des déplacements humains. Leur automatisation est possible avec des interfaces homme-machine qui suivent l'évolution du monde informatique, et des systèmes de repérage allant de la simple application de scotch au sol à l'utilisation de transmissions radio ou satellite (Figure 54)

Plus communes, les micros grues de chantier (Figure 55 et Figure 56) ne sont pas des engins de pose automatisés. Elles s'appuient néanmoins sur les technologies mécatroniques pour faciliter leur contrôle. Les systèmes mécatroniques peuvent aider à la manipulation d'éléments lourds en garantissant la précision de la pose.

Enfin, le développement de systèmes d'intelligence artificielle permet d'envisager l'automatisation de tâches répétitives sur des engins déjà existants. Le trajet du camion présenté (Figure 57) est enregistré une fois et reproduit à l'infini, sans besoin d'un conducteur.

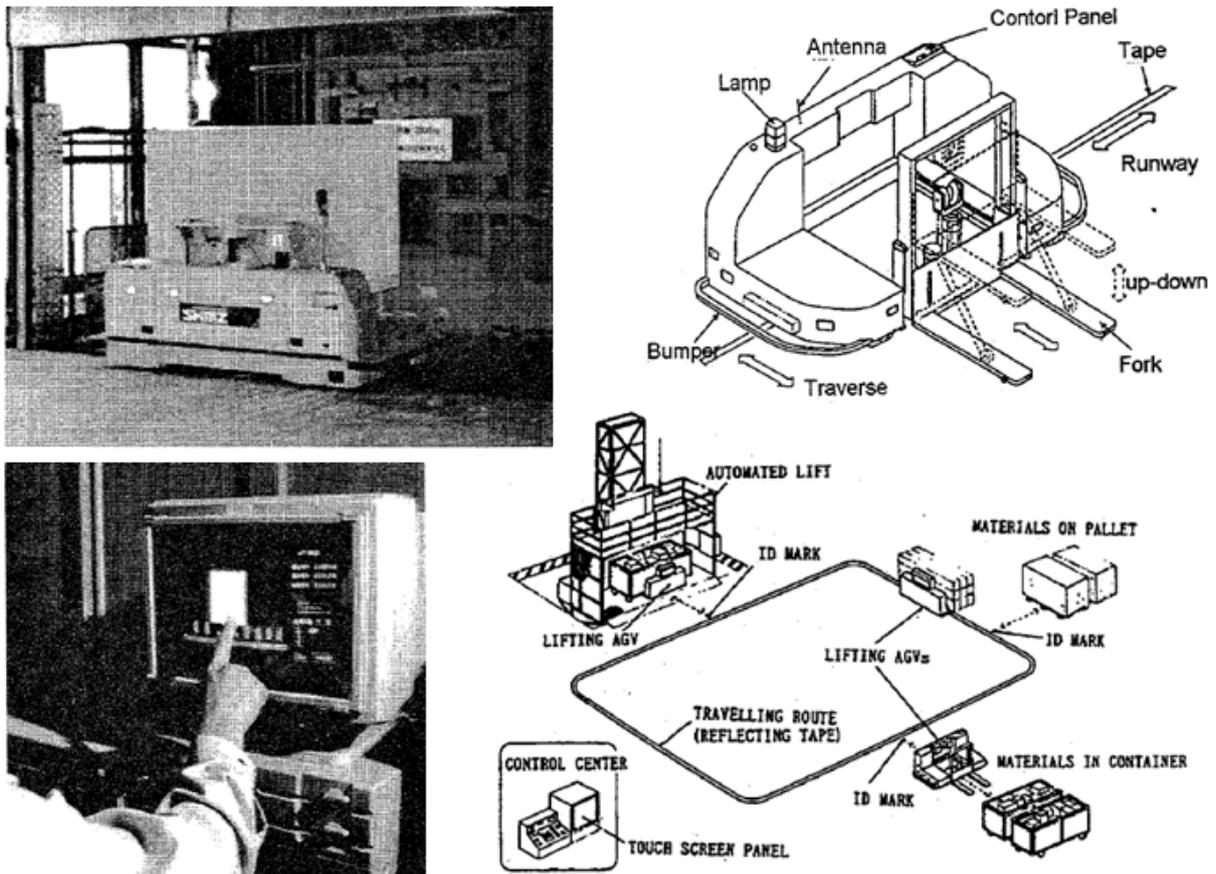


Figure 54 Material-Handling System for interior Finishes – Shimuzu corp, Mistubishi Heavy Industries

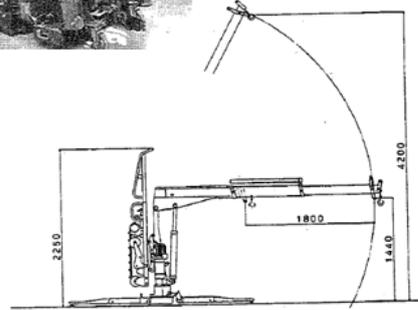
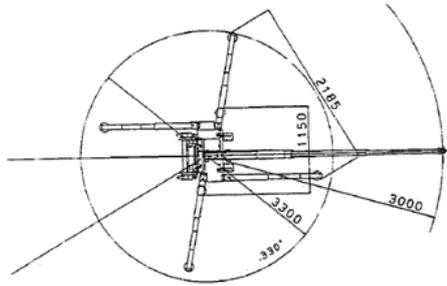
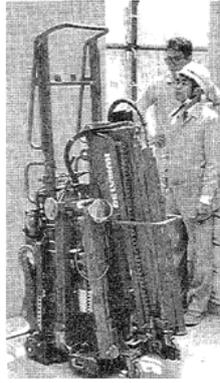
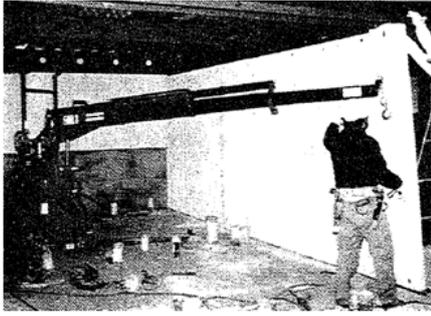


Figure 55 K A L C A T T A – LM15-1 – Komatsu Ltd

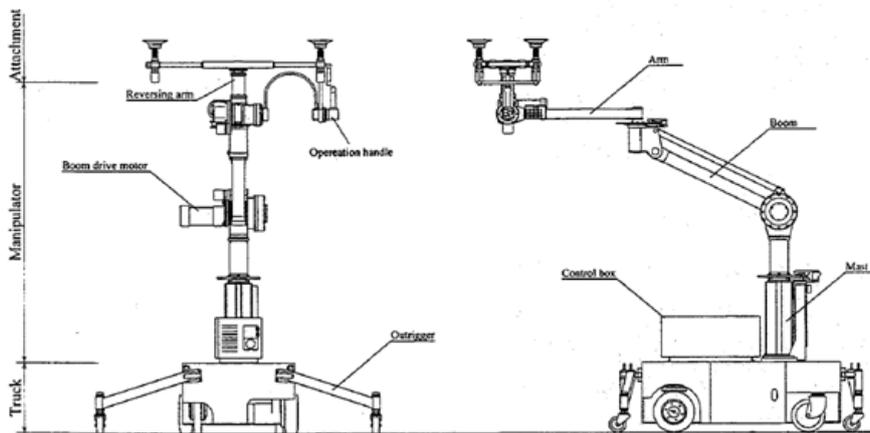
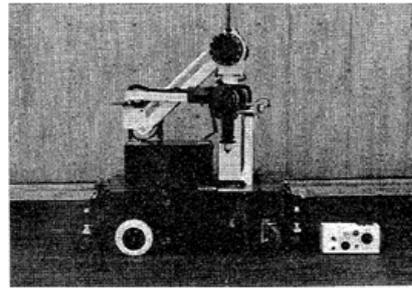
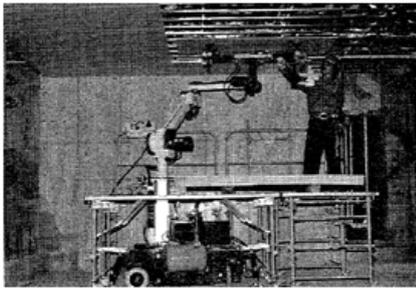


Figure 56 Light Weight Manipulator – Tokyu Construction CO

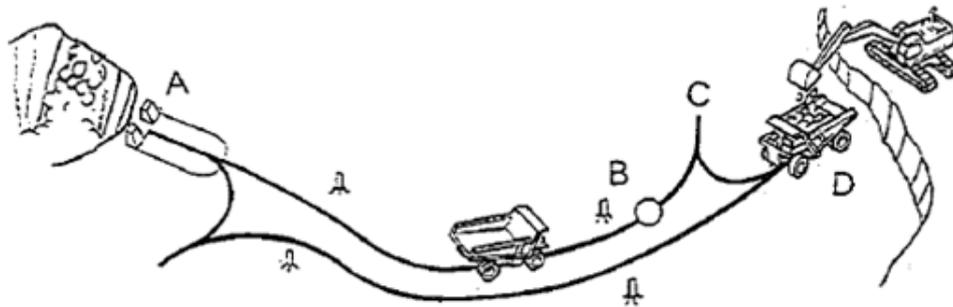
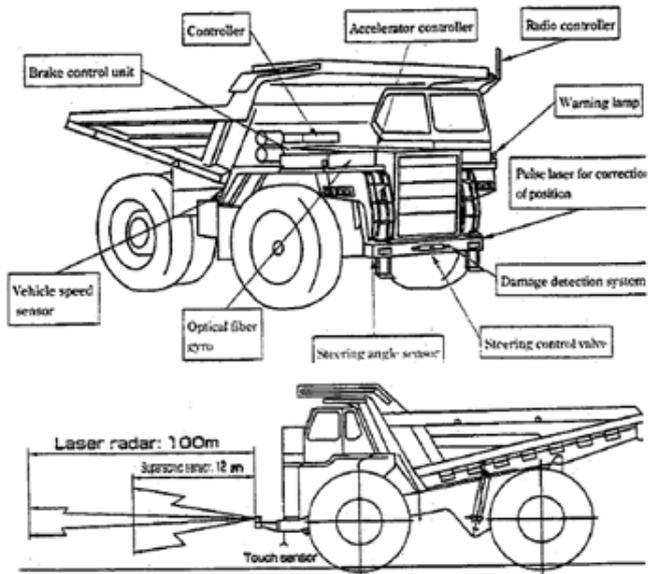


Figure 57 Autonomous truck system– Komatsu Ltd

Structures métalliques

Le montage de structures métalliques, lorsqu'il est répétitif, peut être assisté par des robots. Le système (Figure 58) soude automatiquement chaque élément. Le métal est soumis à de fortes dilatations, et l'ajustement de la pose peut être problématique. Des systèmes automatisés de correction de l'aplomb (Figure 59) permettent de réduire le nombre d'opérateurs et l'outillage nécessaire pour le positionnement de l'ouvrage.

Le fort développement de la mécatronique au Japon a permis l'apparition de systèmes complexes et plus imposants que ceux que nous avons vu jusqu'à maintenant. Le robot Canopée (Figure 60) gère le transport et la pose d'éléments préfabriqués en métal pour construire le noyau d'un bâtiment. Il grimpe ensuite automatiquement pour réaliser les étages suivants.

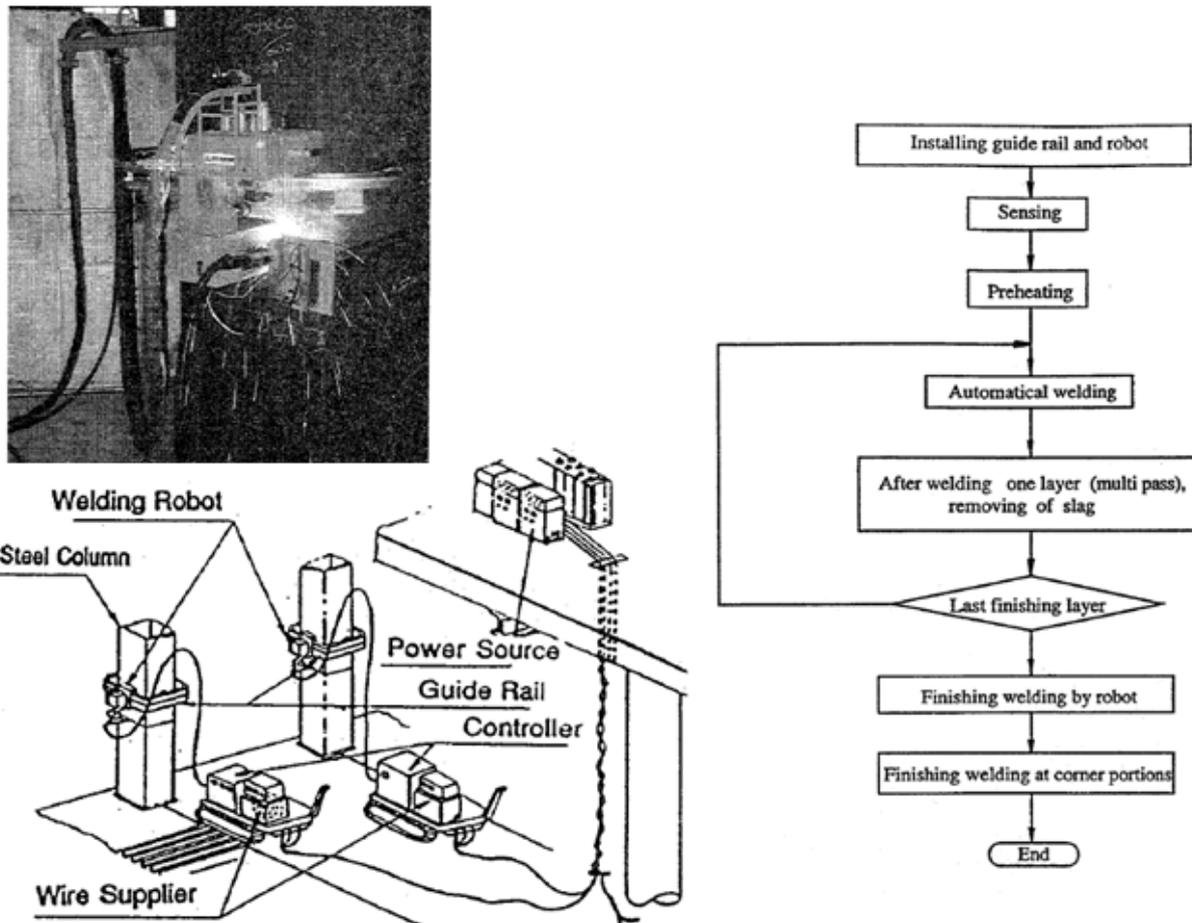


Figure 58 Column Welding Robot– shimizu corp, Mistubishi Heavy Industry

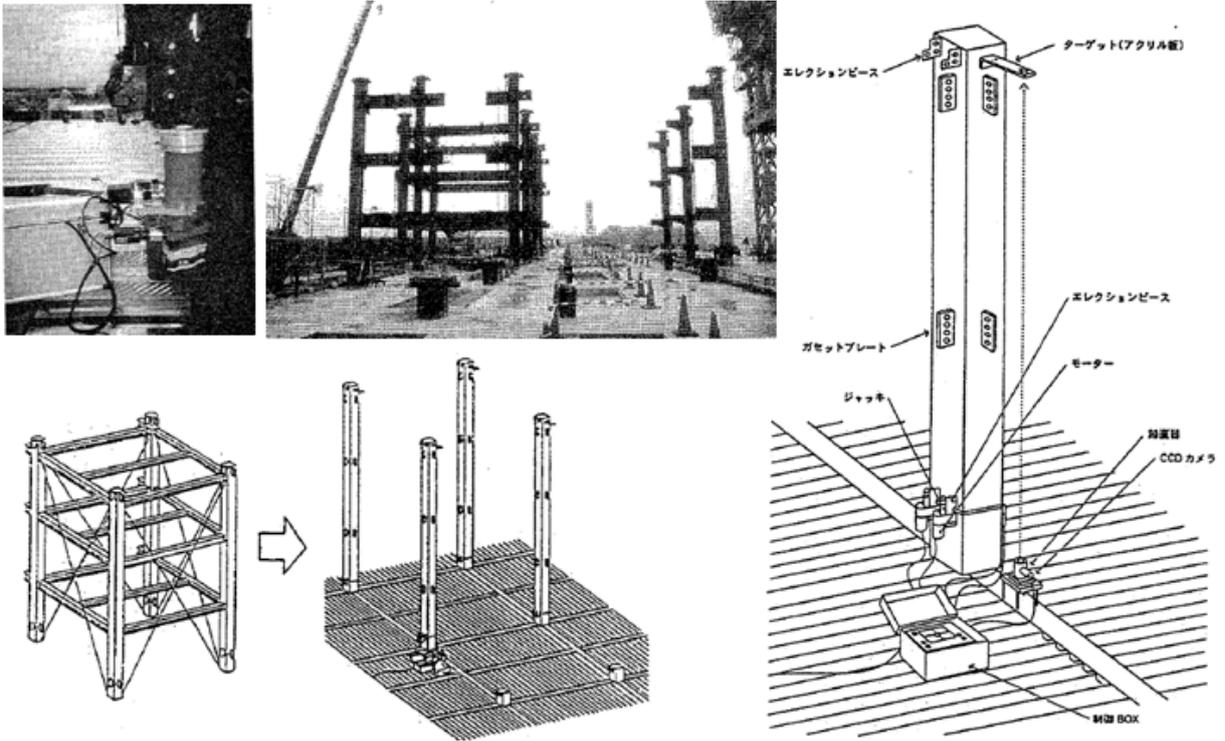


Figure 59 Plumb Navi- Toda corp

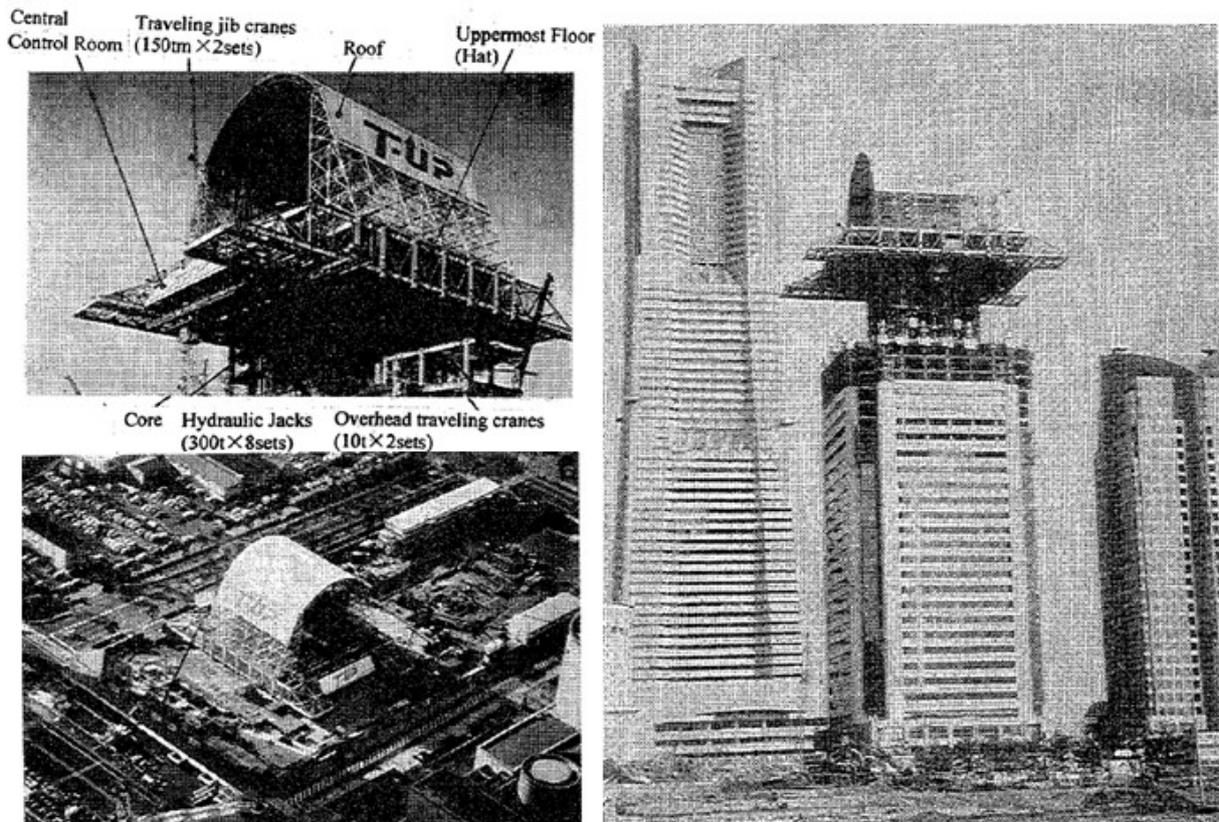


Figure 60 T-UP Building Construction Method- Taisei corp - 1992

Peinture et enduis

Des robots conçus spécifiquement pour un projet ou l'automatisation de systèmes existants peuvent aussi permettre les travaux de peinture et d'enduis. Des systèmes intégrés sur rail ont vu le jour (Figure 61). Ils nécessitent une prise en compte dans le projet de conception du bâtiment. Ceux-ci permettent la maintenance de l'ouvrage tout au long de sa vie. Le système (Figure 62) gère l'application d'enduis résistant au feu sur des ouvrages de structure en sous-face grâce à un mouvement préprogrammé. Ce système résout principalement des problèmes d'accessibilité en hauteur sur les ouvrages à traiter. Avec l'intégration de mécatronique, des équipements existants peuvent être optimisés comme ces gondoles (Figure 63) pour des travaux de peinture automatisés. D'autres détournements de systèmes ont vu le jour comme le robot Figure 64 reprenant le principe des robots nettoyeurs de piscine. Il est employé pour la peinture sur des ouvrages à formes complexes ou non régulières.

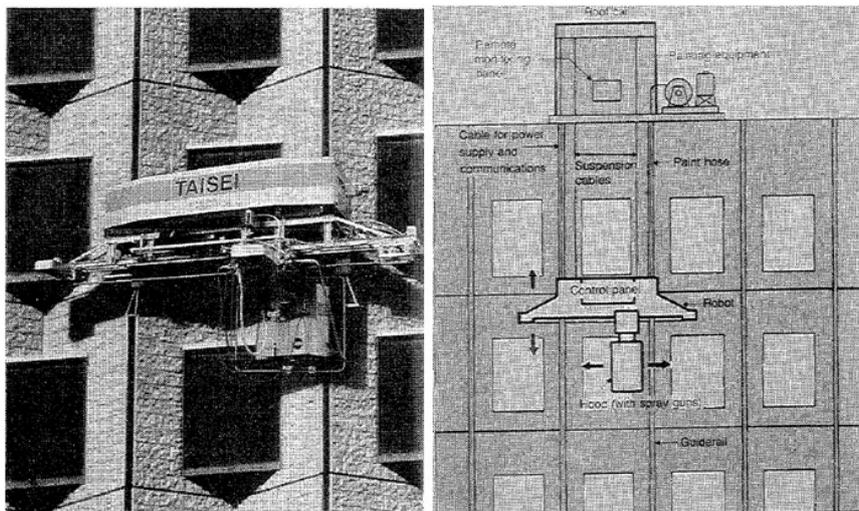


Figure 61 Robot for Painting Exterior Wall – Taisei corp – 1988

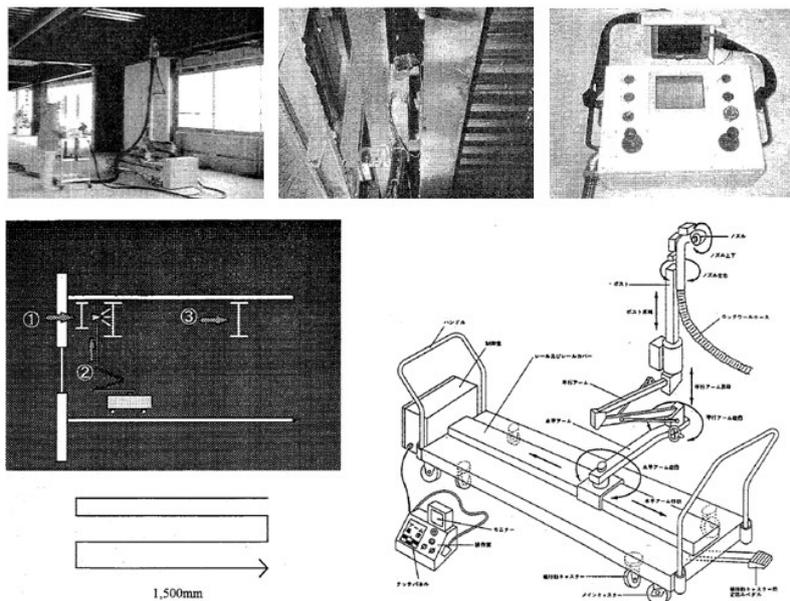


Figure 62 Fire-resisting Rock Wool Spraying Robot – Toda corp, Nozawa corp

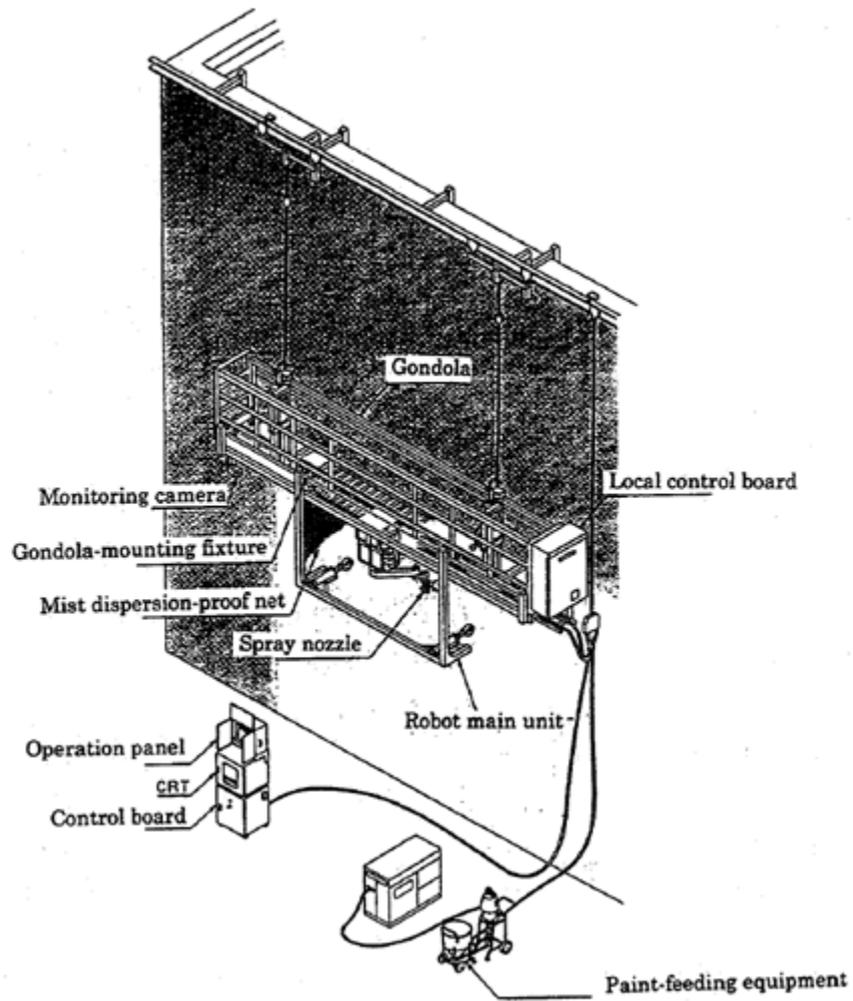


Figure 63 Exterior-Wall Painting Robot – Kajima corp

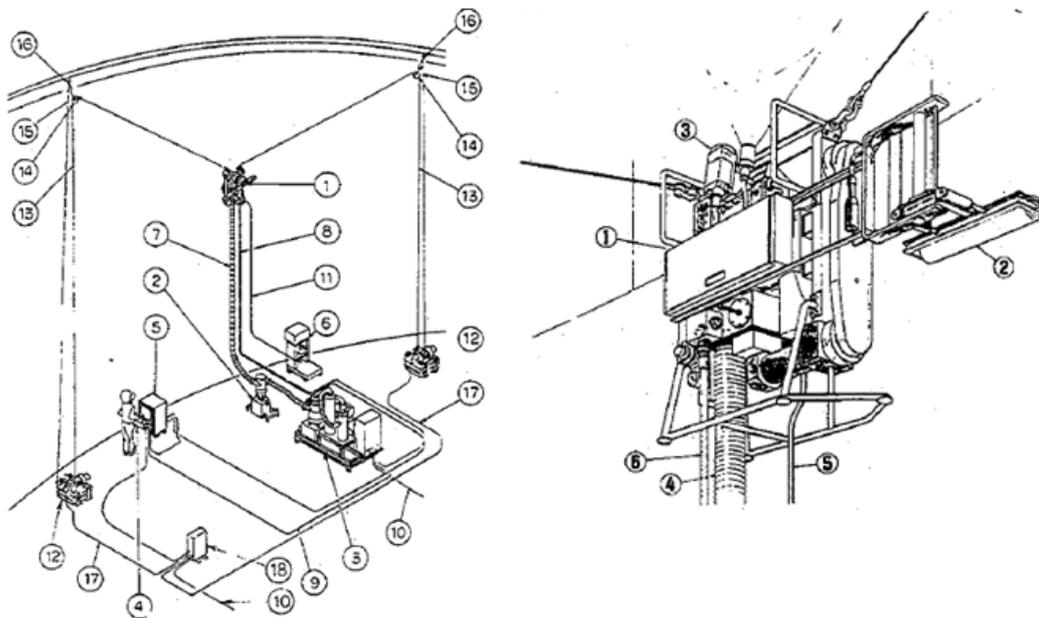


Figure 64 Vacuum and self-travelling system Polishing and Painting robot – Urakami

Inspection et maintenance

L'inspection et la maintenance d'ouvrage avant et après le chantier sont souvent nécessaires. Ce robot (Figure 65) vérifie le fruit et la régularité de maçonneries en briques. Il permettait d'obtenir une modélisation très fine de l'ouvrage à l'époque où les relevés par lasergrammétrie n'étaient pas encore fiables. Ce type d'engin est donc rendu obsolète aujourd'hui. Néanmoins pour certains relevés, les zones les moins accessibles restent un défi pour les constructeurs. Les systèmes d'inspections complémentaires sont toujours nécessaires, comme par exemple ce robot d'inspection des gaines et canalisations (Figure 66).

Pour compléter ce tour d'horizon et nous recentrer sur les activités sur chantier, nous pouvons citer l'exemple de cette station de lavage automatisée (Figure 67). Elle s'adapte aux engins, et évite le recours aux systèmes traditionnels de tranchées qui, en plus d'être polluants, impactent de manière lourde le phasage d'un chantier.

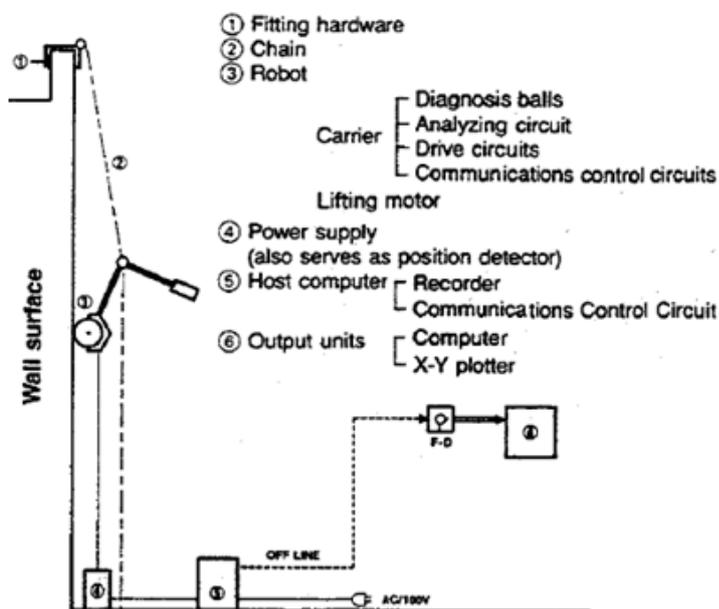


Figure 65 Exterior wall tile inspection robot – Taisei corp

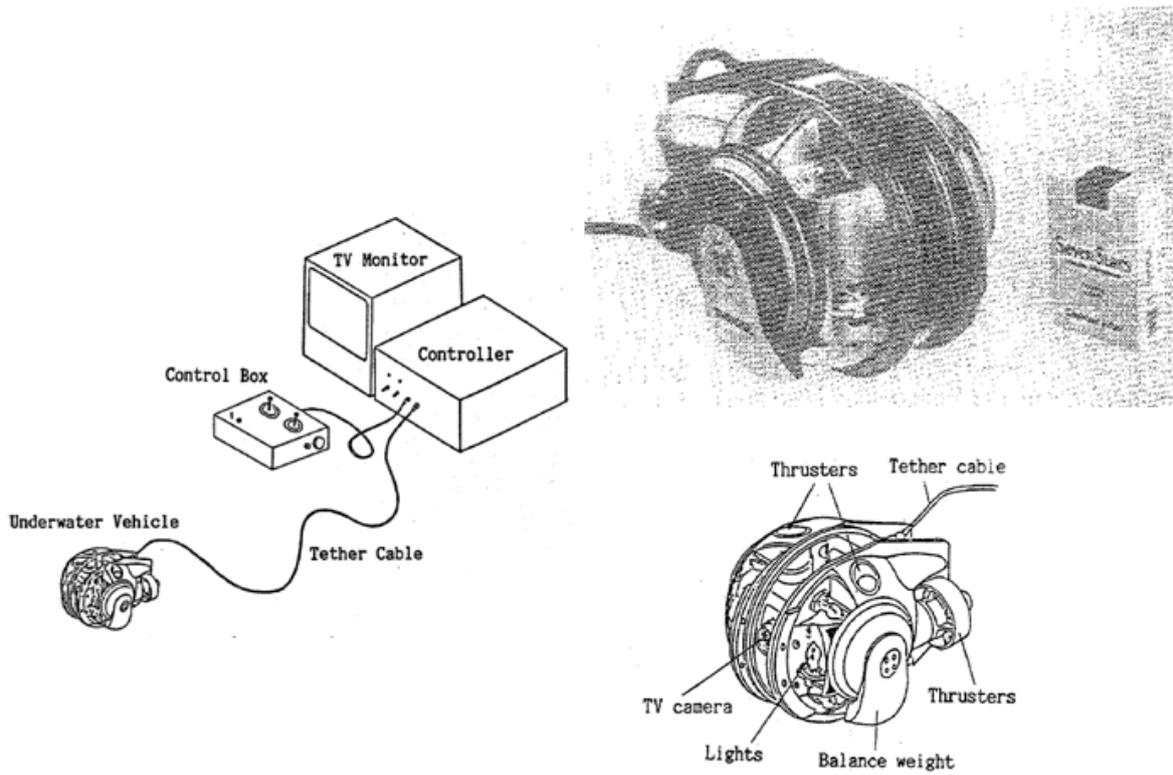


Figure 66 Underwater inspection robot –Toshiba corp

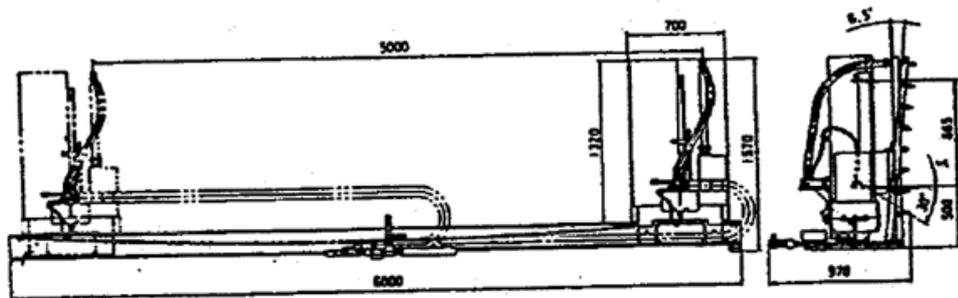
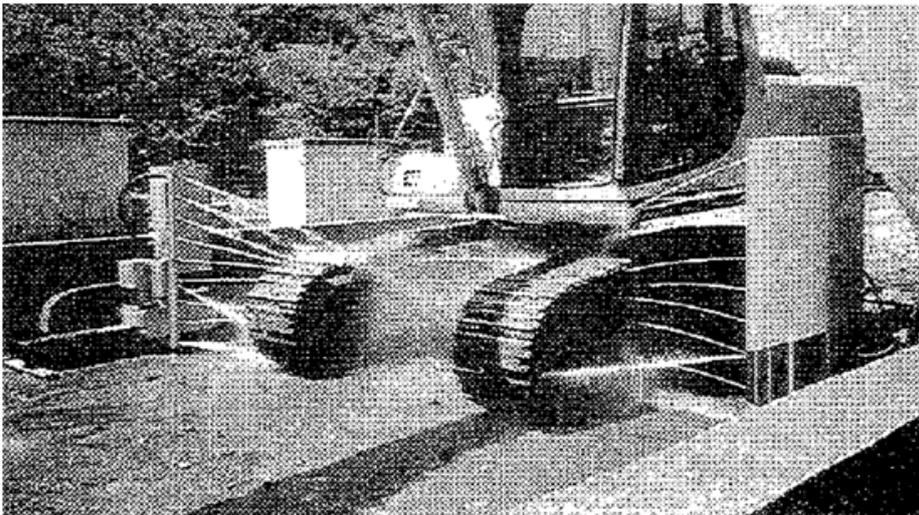


Figure 67 Automatic cleaning system for the under carriage – Komatsu

Systèmes de construction intégrés

Nous déjà avons vu quelques exemples de systèmes construction intégrés pour le béton et le métal. Ici la logique est la même, mais plus poussée techniquement. Ils reprennent le modèle de l'usine avec ses chaines de montage robotisées pour le transposer sur un chantier. Sur la Figure 68 une plateforme reprend le système des robots cartésiens. Les éléments préfabriqués ou préassemblés sont posés directement. L'ensemble monte suivant l'avancement de la construction. Il a fallu deux ans pour construire ces 40,000 m² d'appartements sur 28 niveaux en béton armé.

Le SMART system (Figure 69) en est un autre exemple. Son principe est réemployé aujourd'hui ponctuellement en Corée et en Allemagne. Son apparition est antérieure à l'exemple précédent, mais sa conception moins couteuse et moins encombrante lui ont permis de se développer plus facilement.

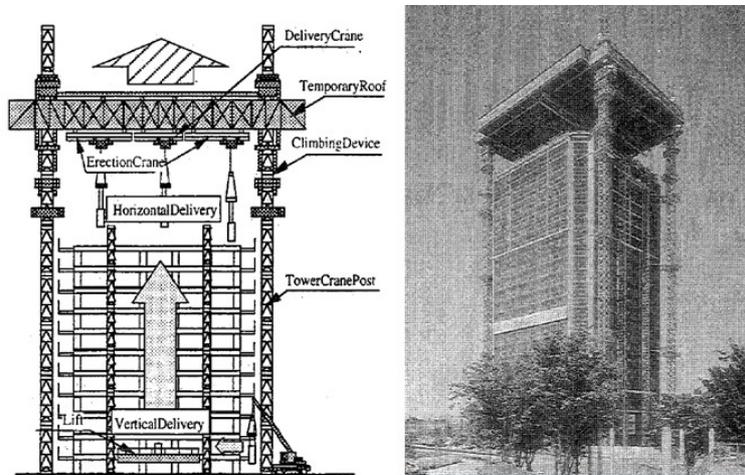


Figure 68 Automated construction system for reinforced concrete building – Obayashi corp – 1995

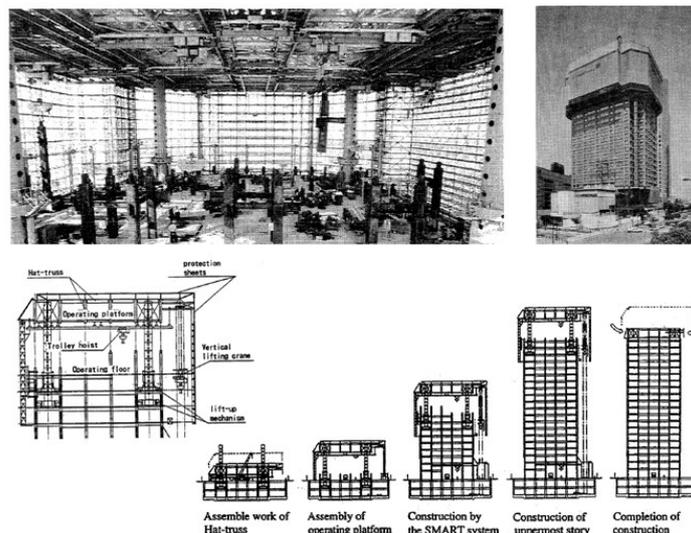


Figure 69 SMART system – Shimizu corp – 1991

4. Synthèse

Dans ce chapitre nous venons d'observer la mécatronique en architecture et en construction par les objets qui les composent. Nous avons d'abord pu comprendre les liens qui se créent naturellement entre mécatronique et architecture par les métiers de conception qui y sont associés et certaines questions comme la gestion de l'espace.

Nous avons ensuite exploré la mécatronique en conception architecturale, où le robot est parfois fantasmé mais aussi un véritable support de production de concepts de fabrication. Des concepts qui sont aujourd'hui incarnés dans des prototypes, mais aussi des formulations de règles de conception anticipant le développement du numérique dans la construction. La production de thèmes tels que le « Continuum numérique » ou « Architectronique » côtoie la production de pavillons et de maquettes, mettant en avant le potentiel créatif de la mécatronique dans la pratique architecturale.

Nous avons poursuivi ce tour d'horizon par le thème de la mécatronique de construction qui pourrait paraître moins spectaculaire. D'abord parce qu'il présente le robot plutôt que ce qu'il produit. Ensuite parce que son développement est antérieur à celui que nous observons en architecture et design. Ce monde est toutefois riche en recherche et développement et a permis d'aboutir sur de nombreux prototypes, traitant d'autant de cas de mise en œuvre. Il paraît alors difficile de croire que tous ces développements n'aient pas encore modifié les pratiques constructives.

Cet état de la mécatronique en architecture et construction ne nous renseigne pas totalement sur la manière dont il a été conçu. Nous connaissons les origines de certains concepts. Nous connaissons les convergences entre mécatronique et architecture. Mais aucun n'explique que le passage vers le monde du chantier ne se soit pas complètement produit.

Ce travail a pourtant été fait du côté de la recherche en mécatronique de construction. Nous le verrons dans le chapitre suivant où nous exposerons ces recherches et leurs limites. Nous profiterons de ce chapitre pour détailler le contenu des sciences de la conception et expliquer la manière dont nous comptons les employer.

Chapitre 4. Connaissances de la conception pour la maîtrise des objets techniques

Ce chapitre nous permet de faire la transition entre le monde de la mécatronique en architecture et le potentiel des sciences de la conception pour accompagner son développement. Nous verrons dans un premier temps que ce travail de spécification des processus de conception a déjà été exploré. La recherche en robotique de construction a permis de décrire des règles de conception et de produire des ouvrages sur ce thème à destination de l'industrie du bâtiment.

Nous aborderons ensuite les sciences de la conception par la présentation de deux théories. L'Architecturologie dont l'objet est la connaissance de la conception architecturale, et la théorie CK permettant d'étudier tout type de processus de conception par le jeu entre connaissance et concept. Nous évoquerons les applications de ces deux théories qui clôture cette première partie et ainsi la description de notre projet de production de connaissance.

1. Des règles de conception pour la mécatronique de construction.

1.1. Premières approches : conception de la robotique pour l'architecture ou conception de l'architecture pour la robotique ?

Un certain nombre d'auteurs, liés de près ou de loin au monde de l'architecture ont produit une grande quantité d'essais, de documentations, de recherches scientifiques traitant de la conception des robots de construction. Certaines sont très complètes, comme par exemple l'étude du professeur Tatsuo Arai (Arai, 2011), qui montre les développements possibles de la robotique de construction par l'étude des applications de la mécatronique la plus récente.

Il serait donc faux de dire que la mécatronique de construction fut générée sans règles de conception car des travaux scientifiques ont soutenu son développement. Il s'agit pour l'essentiel de description des différents cadres dans lesquels les premiers outils de ce type se sont développés et l'observation d'autres milieux industriels pour proposer des voies d'innovation.

Nous pouvons aussi citer le travail de Thomas Bock sur lequel nous reviendrons plus en détails dans ce mémoire. Il propose dès la fin des années 80 des règles de conception d'architecture modulaires adaptées aux outils de fabrication numérique de l'époque. Il le fait sur la base d'une étude des systèmes d'assemblages et des simulations d'ordonnancement de ces éléments suivant des règles de conception architecturale (Figure 70). Ici les règles de conception de la robotique de construction s'étendent donc à la conception architecturale.

Nous retrouvons des aspects similaires dans l'étude d'Olivier Piot et Jean-Marc Carlier en 1991 intitulée *Les influences de la robotique de construction sur les formes architecturales* (Piot & Carlier, 1991). Cet ouvrage présente une analyse exhaustive des capacités de la robotique de construction des années

antérieures à 90. Cette étude s'appuie, entre autres, sur des recherches et documentations produites par le CSTB. Elle se concentre sur l'utilisation d'un système appelé S.O.R.C (Site ordonné pour Robot de Construction) et son impact sur la production de formes architecturales. Trois méthodes de SORC sont présentées : Rail, Dalle, Noyaux. Une explication de l'échec du développement de ces outils robotiques est aussi présentée : obstacles économiques et contextuels.

Sur la même période une autre approche de Thomas M. Gatton et L.T. Boyer propose l'étude des rapports entre les différents acteurs d'un projet de construction et une manière d'organiser le processus de conception pour permettre l'automatisation de la construction (Figure 71).

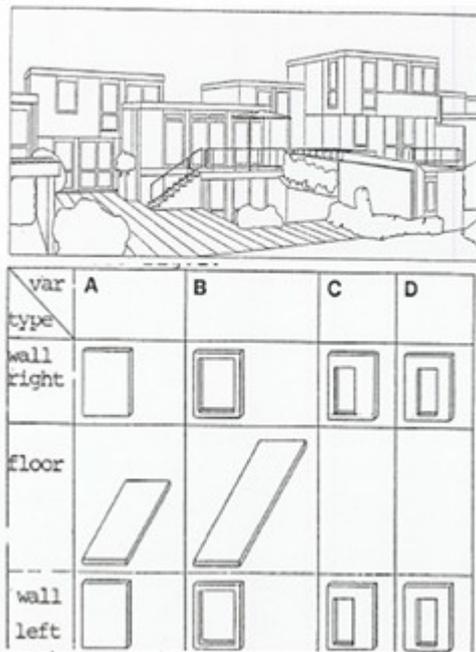


Figure 70 Robot oriented design of variable building kits (Bock, 1988b)

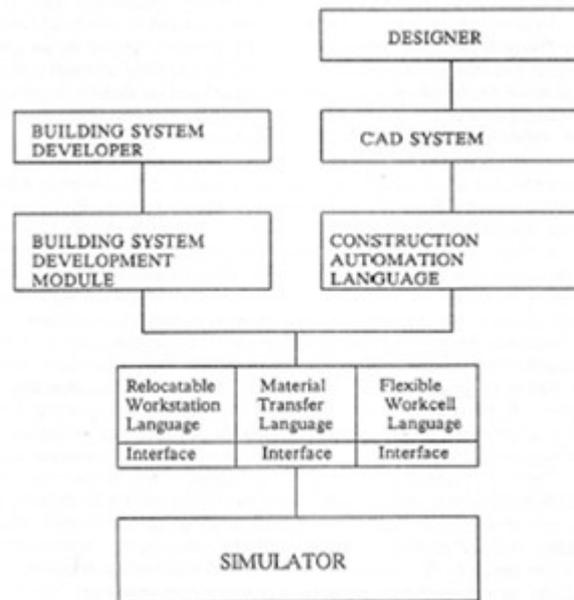


Figure 71 Design for automated construction (Gatton & Boyer, 1988)

Ces ouvrages révèlent bien une pratique de la conception de la mécatronique en architecture, mais ne font pas état des aspects cognitifs mis en œuvre lors de cette conception. Ils donnent néanmoins des clés pour la production d'une pensée orientée vers la mécatronique de construction. Ces études proposent même un aller-retour entre la conception architecturale et celle de la mécatronique de construction. Elles datent d'une autre époque mais ne sont néanmoins pas obsolètes. C'est l'absence d'une approche sous l'angle des sciences cognitives qui va nous pousser à creuser plus loin.

1.2. Robot Oriented Design : Une synthèse des connaissances sur la conception de la robotique de construction.

Cinq champs d'exploration pour bouleverser la conception par la robotique de construction

Nous avons pu voir que des recherches tendent à faire converger conception architecturale et conception de la robotique de construction. L'apogée de ces réflexions apparaît en 2015 alors que

nous avons déjà entamé notre recherche. Thomas Bock propose des méthodes de conception de la robotique de construction à travers son ouvrage *Robot Oriented Design* (Bock & Linner, 2015). Ce travail est l'aboutissement de trois décennies de recherches sur le sujet. Il offre un tour d'horizon de la robotique de construction ainsi que des méthodes de fabrication pour formuler des propositions d'intégration de nouvelles approches transversales dans la conception de la construction. En voici une synthèse :

- Complémentarité des produits (corps d'états), organisation de l'information et état de l'art technologique des machines de construction.
- Introduction aux concepts significatifs de la conception orientée robot : Notions de robotique, notions de modularité, notions industrielles.
- Observations des modes de production des usines hors du monde de la construction de bâtiments : Construction navale, aérospatiale, automobile...
- Gestion et organisation, de la structure et de la fabrication dans le cadre de la conception orientée robot. Aboutissement des recherches concernant la conception d'éléments modulaires adaptés à la production automatisée (Bock, 1988b).

Cette liste se conclue sur l'utilisation des sciences de l'innovation. Il s'agit d'une proposition qui reprend l'ensemble des sections précédentes pour les traiter de manière disruptive. Le remplacement d'une méthode de construction existante par une méthode robotisée peut ne pas être pertinent dans une logique de système. Contrairement à ce que l'on aurait pu penser cette proposition n'évoque pas les sciences de l'innovation telles que nous les entendons. L'intervention des sciences cognitives pour l'aide à la conception n'y est pas présente.

Pertinences pour le monde industriel et pertinences pour les concepteurs ?

La pensée de Thomas Bock est très proche de la conception réglée. Ces théories de la conception ont déjà fait leurs preuves, mais elles ne permettent pas de répondre à nos interrogations. En effet, des propositions de générations de concepts sont décrites, mais elles ne permettent pas de modéliser un processus de conception. Nous souhaitons que notre travail de recherche soit complémentaire de celui de Thomas Bock.

Ces travaux se rapprochent tout de même de ce que nous souhaitons car ils définissent des espaces de références pour la conception des robots de construction. Nous pourrions vérifier leur existence dans les processus de conception que nous observerons. Nous pourrions compléter ces travaux par l'identification des opérations de conception qui permettent de les organiser au sein d'un processus.

Par ailleurs les recherches sur la conception des robots de construction ne font pas état des activités de conception instrumentées grâce à la mécatronique de conception. Ces dernières sont issues de pratiques récentes dans le monde de l'architecture et doivent être étudiées de la même manière.

2. Théories de la conception

2.1. Définir la conception

Si l'on s'en tient à la définition la plus basique, la conception est l'action d'élaborer quelque chose dans son esprit (Larousse, 2005a). Nous avons vu en filigrane que l'activité de conception s'incarne dans un processus que les sciences de la conception sont capables de représenter à travers des modèles. Nous allons voir comment ces modèles sont constitués à travers deux théories. D'une part l'Architecturologie, et de l'autre la théorie C-K. Ces deux théories sont un support de développement d'outils d'aide à la conception et par extension d'aide à l'innovation. Nous verrons donc comment ces travaux de compréhension des processus de conception se transforment en outils d'analyse de projets ainsi qu'en outils de gestion. Mais avant cela, nous devons définir ce qu'est la conception.

Dans son ouvrage *Conception* Philippe Boudon, fondateur de l'Architecturologie, développe un propos sur les opérations et processus de conception. Il veut nous amener à la compréhension de sa démarche d'étude de la conception par le biais d'opérations constitutives de la conception architecturale qu'il peut justifier par l'observation de deux occurrences d'un même découpage de l'espace opéré par deux architectes dans des projets pourtant distincts.

« Un tel découpage de l'espace alloue la conception en niveaux différents est une opération clairement identifiable, énonçable, partageable. » (Boudon, 2005)

Cet élément est désigné comme le point de départ pour ériger l'étude de la conception architecturale à un niveau scientifique, puisqu'il est alors possible de révéler des éléments de la conception architecturale généralisables. Nous souscrivons à ce constat qui fut un élément moteur pour notre recherche. Nous cherchons à produire des méthodes d'approche de la mécatronique, dont certaines vont relever de la conception. Il nous paraît alors plausible de le faire par le biais de propositions, issues de l'observation de processus de conception qui seraient du même coup « *identifiables, énonçables, partageables* » (Boudon, 2005). S'il est donc concevable que la conception puisse être étudiée, comment peut-on alors la définir ?

« On postulera donc que le projet se déroule dans un espace de conception, lequel est à distinguer, tant de l'espace du géomètre, que de l'espace de l'architecte. Soit un espace fictif, théorique, dans lequel des opérations attribuent des mesures à des objets en conception »
(Boudon, 2014)

La Conception architecturale peut donc être définie en tant qu'espace mental à l'intérieur duquel l'on retrouve des opérations des conceptions. Celles-ci sont des opérations d'attribution de mesures sur un modèle grâce à des espaces de références.

Notre recherche nous fait sortir du cadre de la conception architecturale. Pour pouvoir désigner ce qui dans nos observations ferait sens du point de vue des sciences de la conception, nous devons nous pencher sur d'autres théories de la conception et identifier les définitions qu'elles en font. Nous avons donc exploré la question à travers les travaux ayant conduit à la constitution d'une théorie de la conception plus générique : La théorie C-K. Pour les inventeurs de cette théorie la conception est avant tout un raisonnement que les sciences de la conception vont permettre de maîtriser.

« Alors que les sciences de l'ingénieur modélisent les objets existants, les théories de la conception guident le raisonnement sur des objets encore inconnus à l'aide des objets connus. » (Le Masson & Weil, 2010)

Cette définition se rapproche de ce que l'Architecturologie peut nous dire de la conception en tant qu'espace mental. Les notions de processus de conception ainsi que d'opérations de conception y sont présentes. S'y ajoutent les notions de raisonnement de conception et de règles de conception. Ce n'est pas par hasard, car ces recherches se sont grandement appuyées sur des théories du design plus proches de l'industrie telle que la conception réglée⁸.

Ces définitions de la conception s'accordent donc et semblent nous permettre d'étudier les processus de conception de la mécatronique de construction ainsi que ses activités instrumentées à travers la mécatronique de conception. Nous allons donc nous plonger dans ces deux théories pour comprendre leur constitution et faire apparaître leurs potentielles applications.

2.2. L'Architecturologie

L'Architecturologie se situe à l'intermédiaire des sciences cognitives et des sciences de la conception, et a pour objet de recherche, la conception architecturale. Pour définir l'Architecturologie, il faut se pencher sur les ouvrages de P. Boudon et du LAREA. « Comprendre comment l'architecte donne des mesures à l'objet architectural » constitue l'objet de l'Architecturologie fondamentale.

Plus tard les travaux de C. Lecourtois sur l'Architecturologie appliquée (Lecourtois, 2004) ou encore ceux de S. Ben Rajeb (Ben Rajeb, 2012) viennent compléter les connaissances dans cette matière qui sera un outil adapté à l'étude de la mécatronique de construction en conception architecturale.

En plus de nous permettre de comprendre la conception architecturale, l'Architecturologie nous permet d'étudier les processus de conception architecturale à priori, et à posteriori (Boudon, 1997). Ainsi nous pouvons construire des modèles de la conception architecturale à partir d'objets construits, ou en cours de construction.

2.2.1 Constitution de l'Architecturologie :

L'Architecturologie définit des classes d'opérations de conception de mesures. Elles sont relatives à différents niveaux de références qui constituent vingt-et-une échelles architecturologiques (Figure 72). Un jeu entre échelles (notées E) et modèle construit (noté M), décrit une suite d'opérations cognitives (Figure 73). Ceci nous permet de produire une connaissance sur la conception architecturale et de la décrire grâce à des concepts propres à l'Architecturologie (Ben Rajeb, 2012). On distingue les classes d'opérations, dites échelles architecturologiques, des opérations élémentaires de conception. Ces opérations élémentaires sont au nombre de cinq et sont définies par l'Architecturologie comme suit :

- *La référenciation* : opération par laquelle le concepteur met en œuvre (se réfère à) des espaces de référence dans la conception architecturale ((Boudon et al., 1994), p154)

⁸ La conception réglée, appelée aussi Systématique design, est née en 1850 et fut développée jusqu'en 1950. Cette théorie de la conception a accompagné le développement de l'industrie et plus particulièrement des bureaux d'études pour constituer un socle de l'organisation de projets de conception de produits ou de services. (Le Masson & Weil, 2010)

- *Le découpage* : Opération par laquelle le concepteur découpe le projet en entités à mesurer ((Boudon et al., 1994), p154)
- *Le dimensionnement* : Opération par laquelle le concepteur découpe le projet en entités à mesurer ((Boudon et al., 1994), p154)
- *L'orientation et le positionnement* : Opérations par lesquelles le concepteur oriente et positionne le projet dans le site (Lecourtois, 2013)

L'Architecturologie propose aussi de comprendre la nature des attributions de mesures. Elle en désigne ainsi trois concepts :

- « Proportions et échelles comme modes de mesure », ou « l'idée de mesure repose sur la comparaison » (Boudon et al., 1994).
- « Elasticité et précision de la mesure » qui part du principe que « lors du travail de conception, l'objet n'existe pas encore [...] il est virtuel », « cette virtualité [...] permet d'envisager un ordre de grandeur de la mesure » (Boudon et al., 1994).
- « Forme et mesure » « Ce mot de mesure [...] doit en effet inclure l'idée que la mesure peut être donnée par la forme. » (Boudon et al., 1994).

Echelles	Définition
Echelle technique	Utiliser des considérations d'ordre technique pour traduire une modalité d'attribution de mesures à une partie ou tout de l'espace architectural (p.167)
Echelle fonctionnelle	Donner la mesure d'une partie ou d'une totalité de l'espace architectural en correspondance à quelques éléments extérieurs qui en règle la destination, l'utilisation ou l'adapte à un usage (p.168)
Echelle symbolique dimensionnelle	La grandeur étant en architecture porteuse de sens, associer le choix d'une grandeur à un contenu spirituel clairement identifiable (p.169)
Echelle symbolique formelle	Concevoir l'espace architectural en conformité avec une forme symbolique. Forme à travers laquelle un contenu spirituel particulier est associé à un signe sensible concret (p.170)
Echelle de voisinage	Attribuer des mesures par contigüité, relativement à des éléments appartenant au voisinage et induisant une continuité spatiale (p.171)
Echelle parcellaire	Mettre en œuvre des mesures en utilisant les possibles permis par la taille, la forme et les limites du terrain donné à l'architecte (p.172)
Echelle géographique	Informer de quelque manière, les mesures d'une partie ou d'un tout de l'espace architectural à partir de considérations sur

	l'orientation des points cardinaux, la situation et le modèle du terrain, les données climatiques, etc. (p.173)
Echelle de visibilité	Situer un objet ou partie d'objet de telle manière qu'il soit vu d'un lieu, ou qu'il ait vue sur un lieu ou un ensemble de lieux, ou plus généralement constituer un point de vue dans l'espace réel (p.174)
Echelle optique	Tenir compte d'un point de vue – au sens propre – pour donner à une partie ou à un tout de l'espace architectural une mesure qui fasse intervenir des modalités suivant lesquelles il est vu (p.175)
Echelle socioculturelle	Prendre en considération des conventions, des formes traditionnelles ou autres héritages socioculturels, pour donner forme et mesure à une partie ou un tout de l'espace architectural (p.176)
Echelle de modèle	Prendre un modèle antérieur, tout en effectuant éventuellement des modifications de divers degrés et de diverses natures (p.177)
Echelle sémantique	Effectuer des opérations de dimensionnement, de découpage ou de référencement permis ou suggérés par des mots ou des expressions verbales (p.178)
Echelle d'extension	Effectuer toute opération de conception d'une partie ou d'un tout de l'espace architectural qui intègre un devenir futur (p.179)
Echelle économique	Concevoir une partie ou un tout de l'espace architectural en relation avec les coûts, ou en se livrant à des jeux possibles d'échanges de coûts entre diverses parties de cet espace architectural (p.180)
Echelle géométrique	Recourir à des considérations géométriques pour découper ou référer des parties ou des totalités de l'espace architectural ou encore pour transcrire d'autres modalités de mesure (p.181)
Echelle cartographique	Etablir le rapport d'une mesure dans l'espace de représentation à la mesure réelle qu'elle représente, en tenant compte d'un point de vue pertinent (p.182)
Echelle de représentation	Lier le représentant au représenté suivant quelque pertinence (p.183)
Echelle de niveaux de conception	Découper, référencer, dimensionner la réalité à concevoir, du micro ou du macro suivant le niveau de représentation dû à une échelle cartographique ou plus généralement, découper l'espace de conception en sous espaces de conception (p.184)
Echelle globale	Faire jouer de façon dominante, principale ou structurante une pertinence qui peut être le fait de l'une des différentes échelles (p.185)

Echelle humaine	Etablir une relation directe entre une partie ou un tout de l'espace architectural à concevoir et la forme, la taille humaine ou les dimensions du corps humain (p.186)
Echelle d'intégration	-

Figure 72 Les différentes échelles architecturologiques qui composent le langage de l'Architecturologie fondamentale (Boudon et al., 1994)

M Modèle	(E) Echelle
Opérande	Opérateur
Ce qui est mesuré	Ce qui mesure
Ce qui est répété	Opérations qui réduisent

Figure 73 Synthèse des éléments constitutifs du processus de la conception modélisés par l'Architecturologie (Ben Rajeb, 2012)

L'Architecturologie a pour objet la connaissance de la conception architecturale. Elle cherche donc à expliquer comment l'architecte attribue des mesures à l'espace. Mais de quoi parlons-nous lorsque nous évoquons le terme de « Mesure » ? Nous avons vu le mécanisme mettant en jeu des opérations de conception par référenciation, dimensionnement et pertinence par rapport à des échelles de conception. Ces mécanismes ne suffisent pas à expliquer la conception si l'on ne comprend pas ce qui se trouve derrière ce terme de mesure. Mais surtout les natures que peuvent prendre la mesure. Ce point fut d'ailleurs primordial dans notre travail de recherche, car nous avons trouvé ici l'essence de ce qu'est la mesure, et donc la manière dont nous pouvons nous l'approprier en dehors des processus de conception architecturaux.

« Toute mesure suppose donc un point de vue – qui peut être multiple – et un instrument de mesure qui dépend de ce point de vue : c'est l'instrument de mesure qui donne la mesure ; celle-ci n'existe pas en soi. [...]. Lorsqu'il conçoit, l'architecte se trouve dans une situation autre : l'objet mesuré n'est pas donné a priori [...]. Le travail de l'architecte consiste à donner des mesures à tout objet qui n'existe pas encore » (Boudon et al., 1994) p104.

On comprend alors que la mesure en conception architecturale ne sera pas celle de la métrologie. On s'éloigne des socles de connaissances techniques présents traditionnellement dans l'industrie. Cette approche différente nous permet d'entrevoir la nature ou les propriétés de ces mesures au-delà des systèmes métriques.

- Proportion et échelle comme modes de mesure (Boudon et al., 1994) p105:

L'architecte peut attribuer des mesures en établissant des mises en correspondance entre des éléments et son objet. Deux modes peuvent être distingués. Lorsque l'architecte fait référence à des objets à l'intérieur d'un même espace de conception, il peut établir un rapport d'attribution de mesure

conjointement. Par exemple la largeur d'une pièce par rapport à la taille de la baie. L'opération d'attribution de mesure est différente lorsque la mise en correspondance se fait par rapport à des éléments dont la mesure n'est pas définie par le concepteur. Lorsque par exemple, l'architecte définit la hauteur de son bâtiment par rapport au voisinage. Toutefois, dans les deux cas, le rapport s'établit par des proportions. Ce qui les lie du point de vue de la conception est la notion d'échelle que nous avons vue précédemment. La propriété de proportionnalité des opérations d'attribution de mesures ne peut donc être comprise sans l'échelle à laquelle elle se rapporte.

- Elasticité et précision de la mesure (Boudon et al., 1994) p106:

La mesure n'est pas forcément figée à tout instant de la conception. L'architecte peut se laisser une marge de manœuvre ; un « flou » concernant les mesures qu'il va préciser au cours de son processus de conception. Par exemple lorsqu'un calepinage est défini. La mesure des éléments composant ce calepinage a des mesures bien définies. Mais l'ensemble du calepinage sera totalement figé, en fonction des limites de la surface sur laquelle il sera appliqué.

- Forme et mesure (Boudon et al., 1994) p107:

La mesure peut être définie par des formes géométriques. Le cube, la sphère, le cône, le tétraèdre permettent d'attribuer une forme sans donner tout de suite des valeurs métriques aux objets. Cette abstraction de la mesure par la forme devient alors une propriété à part entière de la mesure en conception architecturale.

Pour résumer, nous avons donc trois natures des mesures en conception architecturale. Des mesures par la forme, des mesures élastiques et des mesures proportionnelles. Nous développerons plus tard la manière dont nous avons exploité ces propriétés pour analyser la conception des systèmes mécatroniques de construction à travers ces axiomes. Nous verrons aussi les perspectives qu'ils nous offrent pour favoriser la production de concepts de mécatroniques de construction en conservant le lien avec la conception architecturale.

2.2.2 Des applications pour l'aide à la conception et le développement de son instrumentation.

Nous avons déjà évoqué les applications de l'Architecturologie dans la description de notre ancrage scientifique. Les concepts Architecturologiques permettent d'analyser des processus de conception et d'en produire des modélisations. Les domaines connus de l'application de l'Architecturologie sont l'éco-conception, la conception architecturale numérique, l'enseignement de la conception, l'analyse du patrimoine. Plutôt que de faire la liste de ces sujets nous allons montrer quelques exemples du fonctionnement d'analyses types.

L'étude des jeux entre échelles lors processus de conception de projets architecturaux permet d'en définir des caractéristiques propres. L'observation d'opérations et d'échelles récurrentes sur des projets similaires permet d'en retrouver ce qui constitue leur identité. Ce travail fut fait pour l'éco-conception (Figure 74). Cette connaissance est ensuite ré exploitable dans de la conduite de projets ou la structuration d'outils d'aide à la conception.

Etudier une pratique de la conception à travers les opérations de conception permet d'en définir des caractéristiques, mais peut aussi fournir des supports d'analyses quantitatives. Il est par exemple nécessaire de construire des méthodes pour mesurer l'efficacité d'outils de conception. Au-delà des caractéristiques techniques de l'outil sa performance est basée sur sa capacité à accompagner le concepteur dans ses attributions de mesures sans les limiter. Nous pouvons voir (Figure 75) que

l'Architecturologie fournit un inventaire de ces opérations qui peuvent servir de socle pour la comparaison des activités courantes de conception architecturale et des activités de conception sur des outils numériques pour la collaboration distante.

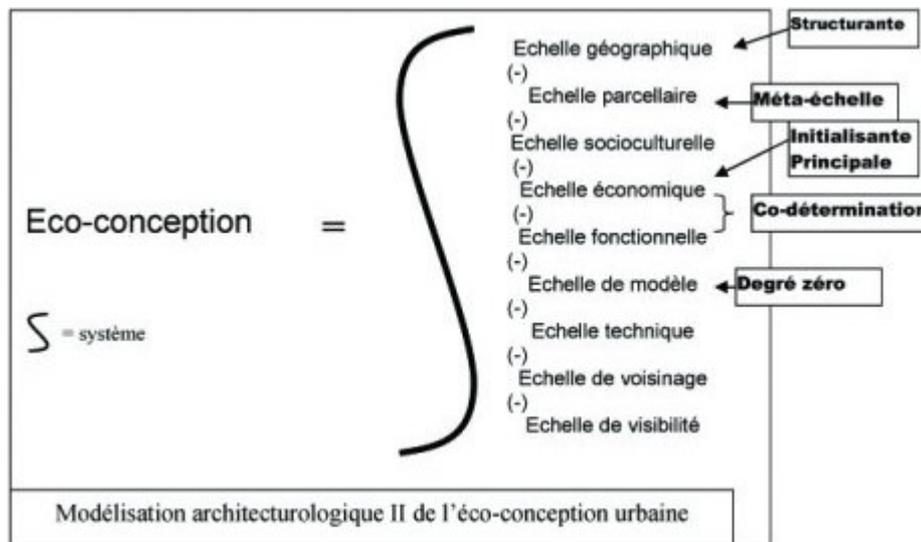


Figure 74 Carte d'identité architecturologique de l'éco-conception (Lecourtois, 2013)

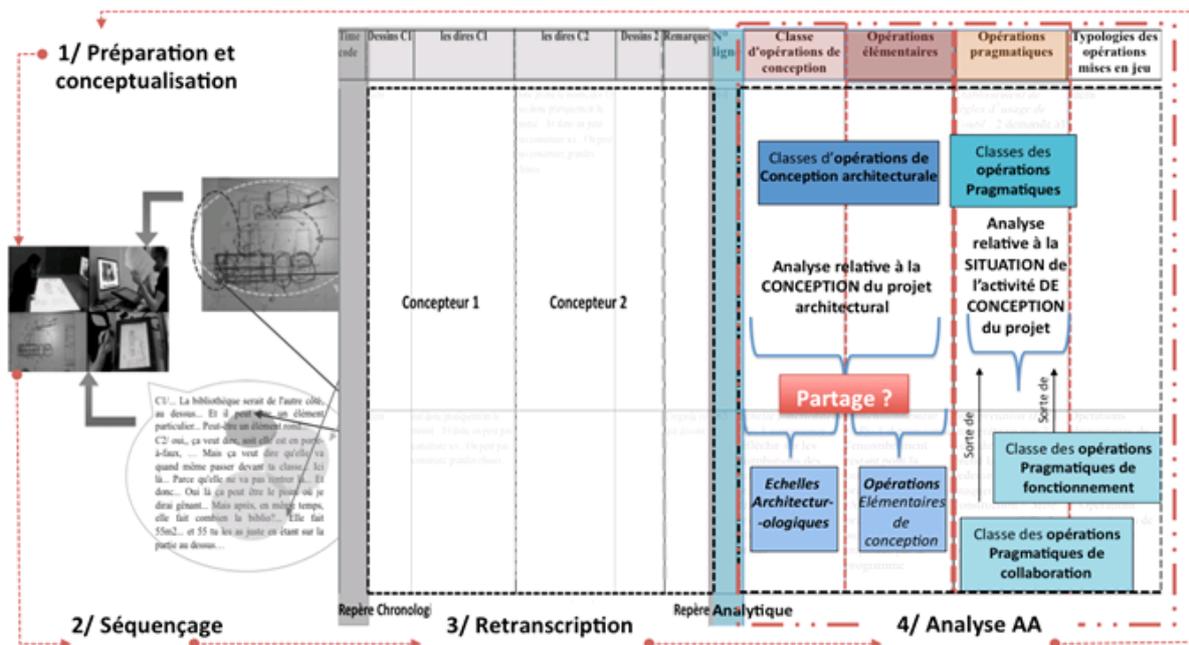


Figure 75 Méthode de traitement et d'analyse des données pour la conception collaborative distante instrumentée (Ben Rajeb, 2012)

2.3. La théorie C-K

2.3.1 Constitution de la théorie C-K

La théorie CK est une théorie de la conception innovante. Elle est employée par des concepteurs ou groupe de concepteurs dans divers champs de l'industrie et des services. Une courte liste de ses applications nous permet d'en rendre compte (Agogué, Arnoux, Brown, & Hooge, 2013):

- Management de la créativité
- Rétroconception
- Management d'un champ de l'innovation
- Discours entrepreneurial
- Gestion de projet
- Conception d'une stratégie d'exploration
- Pilotage de la recherche et gestion des connaissances
- Pilotage commercial d'une lignée d'innovation

La théorie C-K fonctionne avec un couple d'espaces de conception. Le premier appelé C représente l'espace des concepts tandis que l'espace K représente celui des connaissances. Les relations entre ces deux espaces sont définies par un diagramme (Figure 76). Nous pouvons repérer la mécanique simplifiée des relations entre les espaces et à l'intérieur de ceux-ci. Ce point est important car il nous permet d'étudier les enchainements d'opérations d'un processus de conception.

Lors de la mise en forme des éléments de conception dans un diagramme, la théorie C-K permet d'organiser les connaissances et les concepts (Figure 77). Nous y repérons les expansions dans l'espace K représentant toutes les propositions ayant un statut logique pour le concepteur. Et les expansions dans l'espace C définies comme des propositions indécidables. Il faut aussi noter le degré d'expansion des concepts (Connu, atteignable, alternatif), et le degré de robustesse des connaissances (validées, en cours, manquantes)

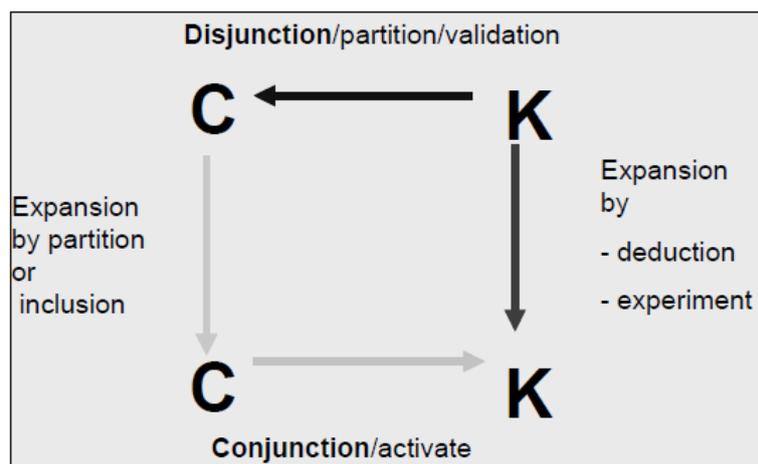


Figure 76. Le "Design square" de la théorie C-K (Hatchuel & Weil, 2003)

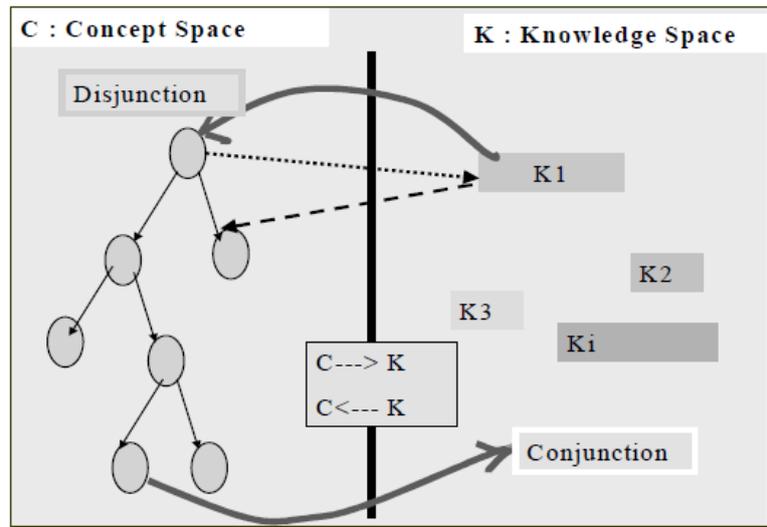


Figure 77. La dynamique de conception C-K.

2.3.2 Des applications dans l'aide à la conception pour l'innovation

La théorie C-K est avant tout une méthode d'analyse de projets. Elle permet d'opérer un travail de retranscription de cas de conception pour en faire un diagnostic. La théorie C-K évoque la conception principalement sous l'angle de l'innovation (Le Masson, Pascal; Weil Benoît; Hatchuel, 2014). Par exemple l'étude du degré d'innovation d'un mode de conception ou la rupture dans l'identité des objets, supposant l'existence d'un dominant design. Ces études produisent des savoirs qui permettent de designer les caractéristiques d'un processus de conception et de formuler des propositions pour la gestion d'un projet. Par exemple la modélisation de deux processus de conception (Figure 78) synthétise la différence fondamentale entre un projet de développement classique et un projet d'innovation. On le repère par l'ajout de plus ou moins de nouveaux concepts ou de nouvelles connaissances (Hatchuel et al., 2016).

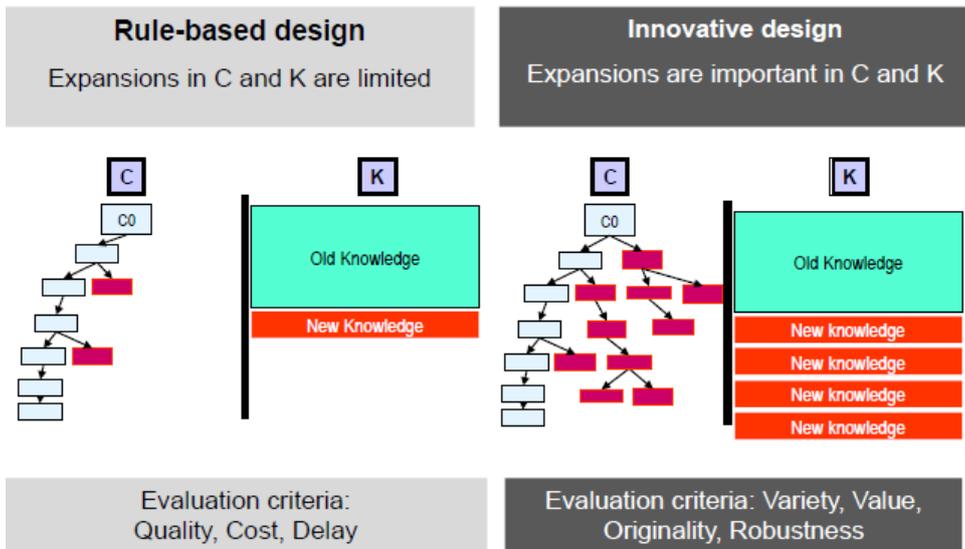


Figure 78. Innovative project evaluation: contrasting product development and innovative design (Hatchuel et al., 2016).

3. Synthèse

Nous venons de voir que le monde de la robotique de construction s'est intéressé aux règles de conception qui lui ont permis d'émerger et lui permettrons de se développer. Nous avons pu observer des travaux tant sur le système que ce qui le compose, et des recherches sur l'industrialisation de la construction et son intégration possible en conception architecturale. Le travail le plus édifiant fut celui de Thomas Bock, concentrant l'ensemble de ces recherches et proposant une conception « orientée robot » pour les architectes et les industriels de la construction. Ces règles de conception auraient pu complètement répondre à notre problématique. Mais il nous semble qu'elles n'incluent pas les dernières avancées en science de la conception, notamment parce qu'elles ne permettent pas modéliser un processus de conception.

L'Architecturologie et la Theorie C-K permettent de décrire ces processus et faire état de raisonnements de conception. Ces deux théories permettent de modéliser des phénomènes de génération et de gestion de concepts. La première s'intéresse essentiellement à l'activité de conception architecturale et décrit un jeu entre échelles de conception et modèles via des opérations d'attribution de mesures à l'espace. La deuxième est plus générique et permet de décrire un processus de conception par le jeu entre connaissances mobilisées et génération de concepts via des opérations internes et externes. Elles nous permettront de mettre en évidence les raisonnements de conception que nous observerons lors de nos démarches d'intégration de la mécatronique dans le monde de la construction.

Ce chapitre clôt notre travail de mise en évidence de l'état des connaissances sur les différents aspects de cette recherche. Nous avons identifié les limites actuelles pour produire une connaissance transverse et opérationnelle sur le développement de la mécatronique en architecture et en construction. Nous allons, maintenant, devoir exposer notre méthode de recherche. Celle-ci va nécessiter d'aller observer les processus de conception au plus près et parfois de les provoquer dans le monde de la construction. Nous verrons la manière dont nous avons choisi de mener ces expérimentations et ce qu'elles d'un point de vue épistémologique.

Partie 2. Méthode de recherche : Concevoir pour comprendre la conception

Cette partie a pour objet la description de la méthode employée pour cette recherche.

Y sont traités :

- *Le contexte de l'étude dans une entreprise générale de construction.*
- *Une exploration des méthodes et outils de recherche adaptés à l'interaction avec le terrain.*
- *Le protocole expérimental de notre étude suivant ces règles de recherche.*

Chapitre 1. Des domaines à explorer, un terrain à construire.....	95
Chapitre 2. Conception et recherche : Gestion des enjeux épistémologiques.....	103
Chapitre 3. Protocoles expérimentaux.....	113

Chapitre 1. Des domaines à explorer, un terrain à construire.

Nous profitons de ce chapitre pour rappeler la problématique et décrire le terrain sur lequel nous allons tester nos hypothèses. Cette problématique a bien sûr évolué au cours de cette recherche, tant par les opportunités d'exploration permises sur ce terrain que par la mise en lumière des travaux de recherche faits sur le sujet. Ces opportunités d'exploration sont le reflet d'un univers professionnel riche mais peu habitué à l'intégration de la recherche dans ses activités. Un univers professionnel rassemblant de nombreux métiers et dont l'organisation évolue régulièrement, au rythme des projets et des chantiers.

Il s'agit d'une entreprise générale de construction dont nous présenterons la composition et surtout la manière dont nous nous sommes intégrés à cette structure. Car la réussite de ce travail de recherche s'est également bâtie sur la constitution d'un rôle identifiable au sein d'une structure industrielle. Nous souhaitons faire apparaître ce rôle particulier de chargé de R&D, sur lequel nous avons dû travailler pour concilier au mieux activité de recherche et animation de l'innovation.

1. Retour sur la problématique

Nous cherchons à connaître la conception des outils mécatroniques destinés à construire. Notre recherche s'articule autour de trois questions :

- Quels outils peuvent être supports de la conception de la mécatronique pour les chantiers ?
- Comment conduire un projet de conception de robot de construction ?
- Comment modéliser la conception de la mécatronique de construction ?

Nous avons pu obtenir une partie de réponses au sein de notre état des connaissances sur la conception architecturale instrumentée, le contexte de la robotique de construction et les sciences de la conception.

Les supports de la conception de la mécatronique sont multiples. Machines à commandes numériques, microcontrôleurs, robotique industrielle détournée. Ils permettent aux architectes de générer des concepts de fabrication numérique, mais nous ne savons pas comment ceux-ci peuvent se déployer dans le cadre d'une activité industrielle de la conception de la construction. Une activité de conception des chantiers à travers la mécatronique de conception est-elle pertinente ? Cette activité permet-elle d'envisager le passage du prototypage à la machine de construction ?

La conduite d'un projet de conception de robot de construction est expliquée dans la littérature scientifique. On retrouve des propositions pour l'organisation de processus de conception ainsi que des connaissances sur l'histoire de la robotique de construction. La formulation de concepts adaptés

aux chantiers pourrait être un choix dans l'inventaire des robots et systèmes mécatroniques de construction. Il existe aussi des règles de conception pour innover dans ce domaine. Mais nous n'avons pas de connaissances sur leur application dans un cadre opérationnel. Nous ne savons pas, non plus, quelles sont les règles qui régissent la construction de ces modèles et nous ne pouvons pas garantir leur application dans le cadre de l'aide à la conception. Il resterait donc à les appliquer pour valider leur pertinence.

La modélisation de la conception de la mécatronique de construction a déjà fait l'objet de travaux scientifiques. Néanmoins ces modèles ne sont pas issus des sciences de la conception. Nous savons que ces derniers trouvent du sens dans la conduite de projet au sein de différentes disciplines. Nos observations concernant les supports de conception et les règles de conduite d'un projet de mécatronique de construction devront être synthétisées grâce à ceux-ci.

Pour pouvoir construire ces connaissances nous avons besoin d'un terrain propice à l'observation des phénomènes de conception de la mécatronique de construction. Or ceux-ci sont difficilement accessibles. La manière la plus simple serait de construire ce terrain. Nous allons voir comment nous avons mis en place une méthode de recherche à travers une activité professionnelle entre science et conception. Nous présenterons aussi la manière dont nous avons dû résoudre les problèmes que ce type d'activité peut générer en explorant les cadres épistémologiques de la Recherche-Action.

2. Concevoir la mécatronique de construction en entreprise générale

Cette recherche est faite dans le cadre d'une CIFRE⁹. Ces dispositifs de financements de la recherche impliquent un rapprochement entre laboratoire, entreprise et doctorant autour d'une recherche qui prend la forme d'une commande. Nous avons choisi d'exploiter ce cadre pour transformer l'entreprise en terrain d'étude privilégié. L'entreprise en question a pour cœur d'activité l'organisation et la réalisation de la construction. Au début de l'étude, la mécatronique est un thème qui lui est étranger mais qu'elle désire développer. Si notre recherche a effectivement pour but d'accompagner cette transformation, c'est principalement par une activité d'innovation et non par des résultats scientifiques qui arriveraient bien plus tard. Nous sommes alors mêlés à la constitution de la pratique que nous souhaitons observer en tant que chercheur.

Le contexte scientifique et industriel de notre recherche nous impose donc de gérer un positionnement complexe vis-à-vis des méthodes de recherche. Pour y répondre nous allons d'abord exposer les éléments que nous avons en début de recherche. Puis nous présenterons les fondements méthodologiques que nous avons mobilisés.

Nous allons décrire ici les éléments qui forment le contexte professionnel dans lequel s'insère cette recherche. Nous y dessinerons les contours de l'entreprise puis détaillerons son activité pour préciser les tenants et les aboutissants du poste que nous avons occupé. Cette partie n'a pas seulement un but descriptif, mais aussi explicatif. En effet ce contexte particulier de recherche doit être clairement posé

⁹ Créé par l'ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) en 1980 et contrôlé par le MESRI (Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation). Le dispositif CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche) a pour vocation de favoriser le rapprochement entre recherche et industrie par le biais de subventions de thèses à l'initiative d'acteurs économiques.

pour comprendre l'ensemble du travail de recherche. Celui-ci a eu des influences sur les directions que nous avons dû prendre, tant par les opportunités offertes, parfois imprévues, que par les choix de gestion opérés par l'entreprise sur la fonction de la recherche.

Les données que nous présentons ici sont celles du début de la recherche. Elles ont sensiblement évolué à plusieurs reprises au cours des trois années de thèse, sans toutefois changer de manière fondamentale les caractéristiques du terrain que nous souhaitons observer. Il n'est donc pas primordial de décrire ces évolutions.

2.1. Contexte de l'entreprise

L'entreprise PETIT est une filiale du groupe VINCI. Il serait fastidieux et contreproductif de présenter ici l'ensemble des entités qui le composent. Nous allons donc décrire succinctement les différentes strates qui lient l'entreprise au groupe. Nos recherches ne concernent pas directement l'organisation des entreprises générales de construction, mais il nous paraît important d'indiquer la position que nous occupons pour relativiser la dimension de nos observations. La nature des entreprises générales de construction fait que le travail de conception de la construction peut y être fragmenté.

Si nous remontons au plus haut de l'organisation il y a le groupe Vinci. Celui-ci concentre plusieurs activités de concessions pour les aéroports, les autoroutes, les équipements ainsi que des activités de contractants pour l'énergie, la construction, le transport.

On retrouve la construction au niveau de Vinci Construction découpé en zones géographiques avec Vinci Construction France, puis Vinci Construction IDF et enfin la Direction Déléguée Petit-Lainé-Delau dont nous faisons partie. L'Entreprise Petit a ses propres filiales, Mainponte, Degaine et ETCR. Celles-ci sont toutes entreprises générales ou tout corps d'état. C'est à partir de ce point que la sous-traitance commence. Nous ne pourrions donc pas intervenir au niveau de corps d'état séparés et nous aurons des difficultés à intervenir sur les moyens de production.

D'autres filiales existent au même niveau que la direction déléguée que nous intégrons. Ces filiales ont la même activité et sont parfois en concurrence sur les mêmes marchés. La concurrence ne se fait pas seulement sur le plan commercial, mais aussi sur le développement. Ce point est important à comprendre car cet aspect de l'entreprise a un impact sur les stratégies d'innovation. D'une structure à l'autre l'innovation se fabrique en miroir voire en opposition.

2.2. Activités et organisation de l'entreprise

Il s'agit d'une entreprise générale de construction. Ce type de structure est classique dans le monde du bâtiment et peut être assimilé aux entreprises TCE (Tous corps d'état), même si ses missions vont au-delà de la simple réalisation de tous les corps d'état. L'entreprise générale a pour vocation de prendre l'ensemble des contrats. Sa dénomination dans le monde anglo-saxon est d'ailleurs « general contractor ». Ce statut particulier pousse l'entreprise à ne pas être un simple exécutant. Elle doit fournir des services supplémentaires au maître d'ouvrage ainsi que des gages supplémentaires au maître d'œuvre.

L'entreprise est consultée par des maîtrises d'ouvrage, suite à la conception de projets de construction par des maîtrises d'œuvre. Lorsqu'elle est sélectionnée, elle s'engage à réaliser tout ou partie de la construction. Ses missions sont entre autres l'organisation du chantier, le respect des normes de la construction, le respect du projet architectural, la gestion des délais de réalisation, la gestion de la sous-traitance et bien sûr le respect du droit du travail. Chacun de ces aspects entraîne une complexité,

amplifiée par la singularité de chaque projet. Cette gestion de la complexité se caractérise par une organisation particulière que nous allons décrire dans la partie suivante

L'organisation de la société dans laquelle nous sommes est classique pour une entreprise générale. Elle est composée d'agences correspondant à des métiers spécifiques ou à des typologies de bâtiment. Mais ce ne sont pas ces aspects de l'organisation qui nous intéressent. Nous allons concentrer cette description sur les services ayant la charge de concevoir le chantier et les modes de production. C'est avec ceux-ci que nous avons pu travailler sur notre objet de recherche. Trois entités sont à noter : Les bureaux d'études de prix, les services travaux, les services d'ingénierie technique.

2.2.1 Les études de prix : conception par l'estimation de la construction

C'est dans ce type de service que sont traitées les réponses aux appels d'offre émis par la maîtrise d'ouvrage. Le service d'études de prix a un rôle commercial, mais aussi de support à la conception. Son rôle dans la conception est particulier car ce service a vocation à optimiser les coûts de production. En effet la conception architecturale est une prérogative de la maîtrise d'œuvre. Un autre aspect de la conception y est donc présent. Celui de rendre réalisable l'ensemble du projet architectural.

Toutefois la conception ne se passe pas directement dans ce service. Le service d'étude de prix va déléguer la conception à d'autres services ou entreprises sur lesquels il s'appuie pour maîtriser l'ensemble des paramètres donc il a besoin. Il participe principalement à la formulation des problèmes et oriente parfois la conception. Ce travail de conception se traduit par des notes sur les enjeux de réalisation des ouvrages ou des propositions de variantes.

2.2.2 Les services travaux : concepteurs des modes de production

Les chantiers sont des entités autonomes dans l'entreprise. Ils ont leur propre hiérarchie et sont responsables du respect du cahier des charges signé par l'entreprise lors du passage aux études de prix. Chaque chantier a donc la liberté du choix de ses sous-traitants, des services supports auquel il fait appel pour répondre aux délais et gérer le budget qui lui est alloué. Le temps des chantiers s'accompagne aussi d'aléas qui sont difficilement identifiables lors des phases d'étude de prix. Les services travaux ont donc une part de la conception de la construction, notamment sur les modes de production.

2.2.3 Services d'ingénierie technique et services supports : spécialisations de la conception.

Les deux premières entités sont courantes dans le monde de la construction. Les bureaux d'étude d'ingénierie et les services supports sont annexes et caractérisent les spécialisations de l'entreprise dans la gestion de la construction. On ne retrouvera donc pas l'ensemble de ces services d'une entreprise générale à une autre. Voici la liste non exhaustive des services avec lesquels nous avons pu échanger et travailler sur notre objet de recherche :

-Prévention. Garant du respect de la sécurité sur chantier. Ce service a principalement un rôle de contrôle. Il produit les règles spécifiques à l'entreprise qui permettent de maîtriser les risques. Il produit également des retours d'expériences sur les accidents et les moyens de les éviter.

-Environnement. Ce service accompagne les chantiers dans le respect des normes en matière de développement durable. Il apporte aussi son savoir-faire dans la maîtrise des labels et certifications. En phase d'étude de prix il apporte son expertise sur la gestion des objectifs environnementaux des projets.

-Clos-couvert. Parfois le clos-couvert est complémentaire du gros-œuvre dans le pilotage du chantier. Ici le service clos-couvert est avant tout un appui à la conception des éléments de second-œuvre en façade et toiture. En étude de prix il propose des variantes de conception et sélectionne les produits correspondant au dessin de l'architecte. Sur chantier, il pilote la production et la mise en œuvre.

-Méthode. Le service méthode est un des piliers de l'organisation de la production. Il produit les plannings de tous les corps d'états, valide les modes constructifs et conçoit le phasage d'un chantier.

-Structure. Le service structure garantit la tenue structurelle de l'ouvrage. Il intervient en conception avec le dimensionnement et l'estimation de l'ouvrage. Il accompagne aussi les chantiers en produisant des plans de gros-œuvre.

-CET. Le service corps d'état technique intervient sur l'ensemble des équipements de l'ouvrage. Climatisation, électricité, ventilation etc... Il est garant du bon fonctionnement de l'ouvrage. En étude il valide la pertinence des équipements prévus. Sur chantier il pilote la mise en œuvre et la mise en service.

-Synthèse. Le service de synthèse est missionné sur les chantiers pour assurer la coordination entre les plans des différents corps d'état et celui de l'architecte. La synthèse a un rôle clef dans le dialogue entre la maîtrise d'œuvre et l'entreprise de construction.

-Maquette numérique. L'essor des outils de modélisations est couplé à une complexité dans la maîtrise des projets. Le BIM a créé de nouveaux métiers à l'interface entre celui de dessinateur et celui d'ingénieur. Le service maquette numérique a pour but d'accompagner les études de prix et les travaux dans le déploiement de ces outils.

-Qualité. Le service qualité assure la rédaction des processus de production dans l'entreprise. Il a un rôle de contrôle, mais il est aussi au service des différentes fonctions de l'entreprise pour assurer leur cohésion.

-R&D. Le service recherche et développement est une création complète dans l'entité où nous réalisons cette recherche. Son fonctionnement est imaginé sur le modèle des autres services techniques. C'est-à-dire en support des études de prix et des services travaux. Il s'agit d'une position particulière dans la recherche qui est habituellement plus au service d'une direction d'entreprise qu'un service support de la production. Nous développerons plus en détail cette fonction car elle a forgé la manière dont nous avons pu déployer nos expérimentations.

2.3. Une entreprise tournée vers l'innovation

L'innovation est un mécanisme de production de valeur supplémentaire dans une entreprise. La littérature sur le sujet nous fait comprendre que l'innovation est issue d'une pensée industrielle, et s'étend jusqu'à une pensée scientifique pour l'optimiser (OCDE, 2002). Le terrain dans lequel nous nous insérons a bien compris les enjeux de l'innovation comme levier d'optimisation et comme moyen de différenciation vis-à-vis de la concurrence. Cela se caractérise par le montage de services spécialisés dans la maîtrise technique des projets et le développement d'activités autour de technologies émergentes telles que le BIM. Ses missions vont de la modélisation jusqu'au développement informatique. Son activité est encadrée par les besoins de l'entreprise à travers des articulations avec les services – topographie, étude de prix, chantier, méthode.

Pour cette recherche, un service « Recherche et Innovation » a été créé. Ceci implique de nouvelles activités qui vont de la production à l'organisation de ce service. Il ne s'agit pas d'un détail, car nous

ne sommes pas en présence d'un terrain complètement constitué. Cela pourrait constituer un biais dans notre recherche car le cas que nous étudions ne s'insère pas dans une pensée générale de l'innovation. De ce point de vue aussi nos résultats pourraient varier d'une structure à l'autre.

2.4. Chargé d'étude R&D en entreprise générale

Dans cette organisation nous rejoignons un ensemble de services supports de l'ingénierie technique qui regroupe les services maquette numérique, structure, clos couvert, CET, méthode et synthèse. Nous sommes directement rattachés à la direction de l'ingénierie en tant que « chargé d'étude R&D » dans un service « Recherche et innovation » créé à l'occasion de la mise en place de notre recherche.

Le cadre des CIFRE postule que l'aboutissement de notre mission professionnelle devra être la soutenance de thèse. Néanmoins nous souhaitons profiter de cette prise de poste pour participer à l'émergence de notre véritable terrain de recherche qu'est l'intégration de la mécatronique dans l'entreprise. Nous participons donc à la rédaction de missions supplémentaires constitutives d'un « service » de R&D. La description de ces missions est faite sur la base d'hypothèses concernant les besoins de l'entreprise en termes d'accompagnement vers la mécatronique de construction et de conception.

Influer sur le fonctionnement d'une entreprise n'est pas neutre du point de vue de notre recherche. Il est donc essentiel d'exposer ici la manière dont nous avons sollicité les acteurs de l'entreprise. Nous l'avons fait par l'intermédiaire de communications (des posters, des articles de journaux et des conférences sur le thème de notre recherche), exposant en partie notre état de l'art, ainsi que les travaux de développement en cours. Nous avons souhaité garder le prisme d'étude construit au départ (mécatronique de conception et mécatronique de construction) afin de construire un langage commun et observer leur appropriation par chacun.



Figure 79 Exemples de productions faites au cours de la recherche sur la conception de la mécatronique pour la construction

Ce poste nous a amené à participer à la conception de la mécatronique de construction. Nous allons donc devoir explorer les fondements scientifiques qui permettent de construire des connaissances sur la conception tout en étant acteur dans la production de ces phénomènes. Nous verrons que les cadres épistémologiques de la recherche-action permettent d'aborder ce sujet. Ceux-ci sont nombreux mais tendent à converger vers des règles simples que nous avons pu appliquer sur notre terrain.

3. Synthèse

Nous avons vu que notre problématique doit être traitée au plus proche du terrain pour permettre des observations au plus proche du réel de la conception de la mécatronique pour la construction. Ce terrain est rendu accessible via l'intégration de cette recherche au sein d'une entreprise générale de construction. Ce terrain nous permet d'approcher des métiers divers, principalement en ingénierie, avec des spécialités par corps d'état ou par fonction d'organisation du chantier et de la production.

Nous avons pu mettre en lumière les logiques de mise en avant de l'innovation, liées à l'ingénierie spécialisée et la manière dont nous avons pu nous y raccrocher pour créer une activité de recherche s'intégrant progressivement aux activités de l'entreprise. Cela passe par la création d'un rôle de « Chargé d'étude R&D » favorisant les interactions avec les différents acteurs de l'entreprise via la réponse à des besoins en appel d'offre ou en mise au point de chantier.

Nous avons pu faire de nombreuses observations grâce à ce cadre, mais ce type de fonctionnement n'est pas neutre et peut avoir des implications en recherche. Avant de décrire plus précisément nos expérimentations, nous devons nous interroger sur la validité de ces méthodes proches de la « Recherche-Action ». Cette étude sera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 2. Conception et recherche : Gestion des enjeux épistémologiques.

Nous avons abordé précédemment l'opportunité et la nécessité d'appliquer des méthodes de recherche en immersion sur un terrain. Cette immersion s'accompagne d'une prise de fonction et donc un rôle ne permettant pas d'avoir une posture uniquement observationnelle. L'objectif de ce chapitre est d'explorer le sujet de la Recherche-Action pour définir le cadre épistémologique à mobiliser pour cette recherche. Nous évoquerons les grandes tendances de la Recherche-Action puis les modèles que nous avons évalués et ferons état des critères de sélection. Nous allons voir que ces modèles peuvent fortement varier et répondent le plus souvent à un ancrage disciplinaire.

1. Introduction

Cette recherche fut marquée par de nombreux éléments nous plongeant dans l'inconnu. D'abord par des connaissances sur la mécatronique à acquérir. Puis des connaissances sur les sciences de la conception à renforcer. Et enfin sur l'entreprise générale et notamment son organisation mobile rendant difficile la définition d'une méthode stable. Nous avons dans un premier temps esquissé le point de vue que nous souhaitions adopter sans entrer dans des considérations matérielles ou pratiques. Nous avons fait l'hypothèse qu'à travers l'observation et l'expérimentation autour de la conception en lien avec la mécatronique dans la conception et la construction nous pourrions déterminer des relations qui feront apparaître des convergences entre mécatronique de conception et mécatronique de construction (Figure 80). Il n'était donc question au départ que de nous intéresser à la partie concernant l'instrumentation de la conception correspondant à la première partie de notre problématique. Nous devons alors réaliser une série d'observations sur les apports de la mécatronique de conception en entreprise générale et valider leur usage. Nous verrons que cette méthodologie a évolué en fonction des opportunités d'observations permises sur le terrain.

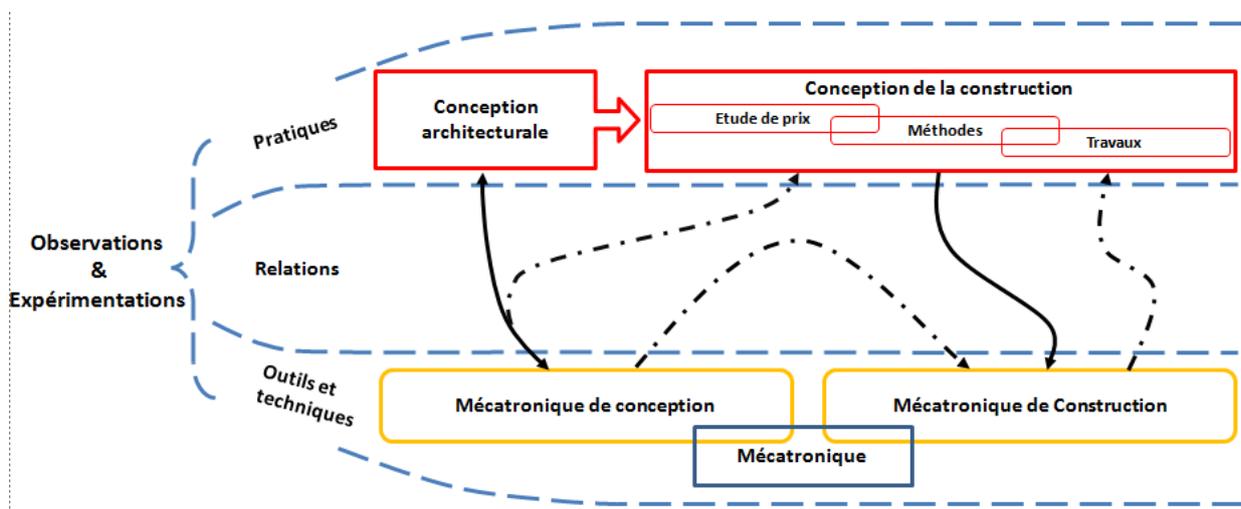


Figure 80 Représentation de la démarche de recherche en début de thèse

Très rapidement, cette posture de simple observateur vis à vis des activités de l'entreprise nous a semblé insuffisante. La mécatronique y est très peu présente et les occasions d'observer des réflexions pouvant y conduire sont difficilement atteignables de cette manière.

Nous avons donc dû construire un deuxième niveau méthodologique nous permettant de générer et participer à ces activités de conception sur le terrain. Nous présentons dans ce chapitre l'état des connaissances sur la recherche-action que nous avons rassemblées pour établir le socle scientifique de cette recherche.

2. Etude de la recherche-action

Avant de présenter notre méthode d'expérimentation, nous devons faire état des aspects théoriques qu'elle porte. Cela passe par un inventaire des différentes notions associées à celles de recherche et d'action (Figure 81). La sémantique autour du thème de la recherche action est vaste, mais elle rassemble des notions qui sont proches et dont les définitions sont d'avantage liées aux milieux d'actions qui les concerne qu'à de véritables enjeux épistémologiques. Néanmoins nous avons dû naviguer dans ces définitions pour convenir d'un cadre solide du point de vue scientifique.

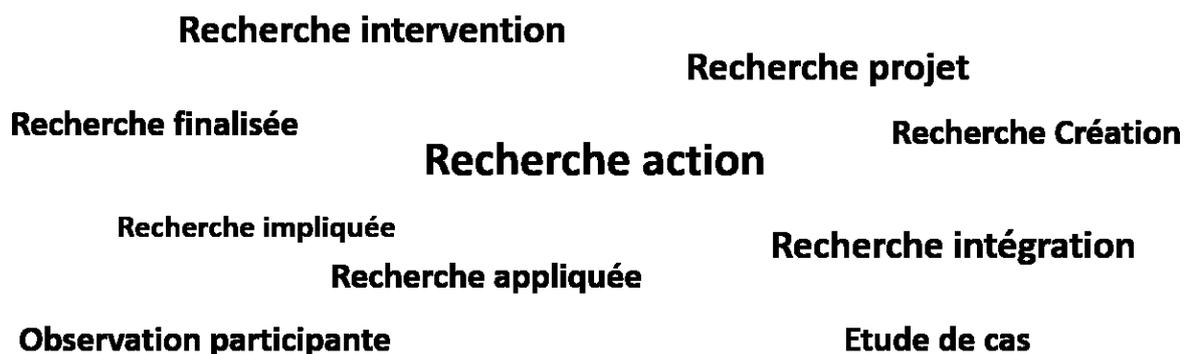


Figure 81 Inventaire de notions liées à la recherche-action

La recherche action trouve une première origine dans les années 40 dans le monde anglo-saxon. Elle porte une connotation politique et est désignée comme un *mode d'action sociale centrée sur les obstacles et les ressources de la dynamique des groupes, « sociaux » ou « naturels »* (Wikipedia, 2017b).

En France, depuis les années 60, elle désigne *les voies très variées par lesquelles les savoirs de l'homme sortent de leur enceinte institutionnelle (du soin, de l'éducation, de l'organisation, de la recherche) pour dynamiser le changement social* (Wikipedia, 2017b)

Sa définition est fixée lors d'un colloque de l'INRP comme des *recherches dans lesquelles il y a une action délibérée de transformation de la réalité ; recherches ayant un double objectif : transformer la réalité et produire des connaissances concernant ces transformations* (Wikipedia, 2017b).

Au sein des sciences sociales la notion de recherche action va prendre plusieurs formes et intègre différemment les disciplines scientifiques. Nous allons exposer ces déclinaisons puis en faire une synthèse exploitable pour notre recherche.

2.1. Recherche projet et recherche création

En architecture des déclinaisons de la recherche action sont apparues sous l'impulsion des sciences du design et la volonté de considérer projet et recherche dans une continuité. Ce double ancrage entre science et pratique aurait pu nous convenir, mais il ne semble en définitive pas s'adresser à notre recherche. Nous pouvons citer les travaux d'Alain Findeli qui posent la notion de « Recherche projet ». Son rapport avec la recherche action est simple puisqu'elle suppose qu'en design on appelle la recherche action – recherche projet (Findeli & Coste, 2007).

La recherche projet propose des outils pour aborder le projet comme lieu de recherche. Des manières de traiter des questions de recherche à partir de question de design (Figure 82) et des points de vue sur les éléments à prendre en compte pour produire une étude complète d'un objet de sa conception à sa réception, d'une commande à sa prise de possession (Figure 83 et Figure 84).

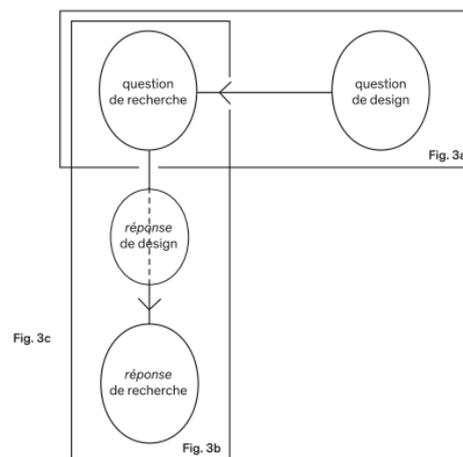


Figure 82 Le modèle méthodologique et opérationnel de la recherche-projet (Findeli, 2015)

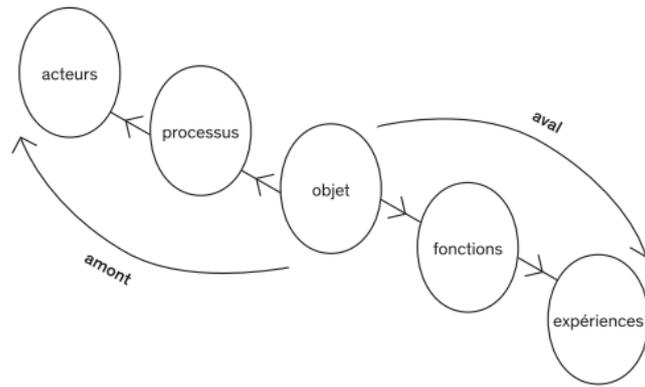


Figure 83 Le modèle dit « de Brême » ou de « l'éclipse de l'objet », exposant une théorie générale du projet (Findeli, 2015)

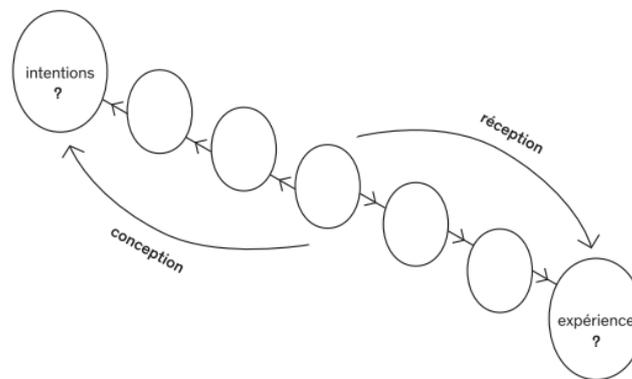


Figure 84 Le modèle de Brême avec les deux volets du projet de design.(Findeli, 2015)

La recherche projet est à différencier de la recherche création. Elle est d'ailleurs l'objet de polémiques dans le monde scientifique (Gauthier, 2015). Celle-ci cherche à définir un nouveau paradigme entre projet et recherche en supposant que la recherche est incarnée par le projet et le projet devient le cadre de production de la recherche. Ce type de recherche vise à produire un objet et c'est l'objet qui livre une connaissance au monde de la recherche. Parmi les exemples de recherche création, sont cités les œuvres de Buckminster Fuller dont le statut de chercheur peut être contesté, mais dont la production fait apparaître très clairement une prise de recul via des concepts scientifiques reconnus (Lechot Hirt, 2015). En nous penchant sur son œuvre *Manuel d'instruction pour le vaisseau spatial terre* (Fuller, 2010), nous constatons que celle-ci prend la forme d'un manifeste et sort du champ de l'architecture et du design. Ceci ne nous paraît pas être complètement un obstacle étant donné que les sciences ont pour objectif d'atteindre l'universalisme. Malgré tout la notion de manifeste nous ramène à des points de vue politiques qui peuvent être soumises à caution. Nous souhaitons absolument éviter ce risque dans notre recherche, surtout sur la question polémique de la place de la robotique dans nos sociétés

2.2. Recherche finalisée

Selon Dominique Vermersch¹⁰, la recherche finalisée semble avoir les mêmes objectifs opérationnels en science humaine que les sciences naturelles vis-à-vis du développement technologique. L'intégration réelle des résultats de recherche serait tant un moyen de validation que d'objectivation. Cela nous ramènerait à considérer la *nature comme instance morale*. La construction d'un objet de recherche devrait alors se cantonner à rester en amont de décisions de développement. (Vermersch, 2008).

Michel Sebillotte¹¹ nous offre un autre point de vue avec une introduction sur le rôle de la recherche finalisée. Elle s'adresserait aux acteurs politiques et économiques. Une de ses prérogatives serait de les orienter. Il nous semble que ce point peut délégitimer une approche scientifique. Il faudrait donc prendre du recul par rapport aux problématiques de ces acteurs. Toujours d'après le même auteur, un des moyens de contourner ce problème serait de se réfugier dans l'interdisciplinarité et légitimer la recherche comme une construction commune. (Sebillotte, 2000)

Le dernier point de vue que nous souhaitons présenter est celui de Bernard Hubert¹². *Il est généralement admis que toute recherche finalisée est par nécessité interdisciplinaire* (Hubert & Bonnemaire, 2000). L'interdisciplinarité est plus qu'un moyen dans la recherche finalisée, mais bien une caractéristique intrinsèque de celle-ci. Il explique que ce dispositif est nécessaire à toutes recherches finalisées et conduit au choix de la complexité.

2.3. Recherche appliquée ou impliquée ?

En Anthropologie la recherche action prend parfois le nom de « recherche impliquée » et « recherche appliquée ». Nous prenons comme référence un article de Bruce Albert¹³. Nous y comprenons qu'historiquement la recherche appliquée en Anthropologie s'est progressivement orientée vers l'appellation d'Anthropologie Impliquée pour des raisons principalement d'éthique scientifique. D'après lui *la notion d'« Anthropologie appliquée » a mauvaise presse parmi les anthropologues français, surtout lorsqu'ils travaillent auprès de peuples minoritaires* (Albert, 1995). Dans le monde Anglo-Saxon ce type de recherche est pourtant courant depuis les années 30. Bruce Albert fait l'hypothèse que cela vient du modèle colonial anglais. Cela se caractérise par une volonté de déployer des connaissances en Anthropologie pour agir sur les instances économiques et politiques au sein de l'empire britannique.

¹⁰ Dominique Vermersch – Ingénieur agronome - Professeur d'Économie Publique et d'éthique – directeur de recherche à l'INRA et membre du Comité Consultatif Commun d'Éthique pour la Recherche Agronomique

¹¹ Michel Sebillotte est agronome. Il a participé notamment à la mise en place du programme de l'INRA de 1991 à 1993

¹² Bernard Hubert – chercheur à l'INRA et l'EHESS – membre du comité scientifique de nature science et sociétés – dirige des recherches sur le rôle des connaissances scientifiques dans la construction des politiques environnementales – les dynamiques d'apprentissages dans des collectifs interdisciplinaires de recherche intervention

¹³ Bruce Albert est anthropologue, membre de l'institut de recherche pour le développement.

Le terme d'anthropologie « Impliquée » suppose la construction de nouveaux objets de recherche allant du local vers le global. Il serait nécessaire d'oublier le temps de la recherche des concepts scientifiques préexistants pour en créer de nouveaux. *Échappant au discours de la « culture-objet » et au récit de l'entropie, elle touche aux dispositifs structurants et au travail néologique que ces perspectives occultent [...] elle suit la piste des réseaux de pratiques, de pouvoirs et de discours où se produit, en s'enchevêtrant du local au global, entre « eux » et « nous », une dynamique historique et symbolique entre- croisée* (Albert, 1995)

2.4. Des méthodes pour les sciences de gestion.

Nous continuons notre exploration avec trois méthodes de recherche mises en avant dans les sciences de gestion. Notre recherche est proche des sciences de gestion par certains aspects présents au sein des sciences de la conception et notamment sa filiation commune avec les travaux d'Herbert Simon. Ensuite par notre problématique qui correspond à des velléités de maîtriser le développement d'outils pour des desseins économiques. Enfin le contexte de recherche qui s'intègre dans un organisme professionnel prenant lui-même la forme d'un objet d'étude.

Deux articles nous ont servi de support. Le premier de Fana Rasolofo Distler¹⁴ et Cindy Zawadzki¹⁵, le deuxième d'Albert David¹⁶. Nous verrons les caractéristiques qui définissent la recherche intervention, l'observation participante et l'étude de cas. Nous évoquerons notamment la spécificité des recherches en CIFRE et la manière dont elles peuvent être dirigées pour être un apport suffisant au monde scientifique.

2.4.1 La recherche intervention

La recherche intervention se distingue par la manière dont elle considère le rôle de l'observation dans la recherche. *La recherche intervention ne se limite pas à la construction mentale de la réalité (c'est le cas notamment de l'observation), mais implique la construction concrète de modèles et d'outils.* Ce type de recherche nous pousse à reconsidérer les modèles classiques scientifiques basés sur la validation d'hypothèses car l'objet étudié évolue au cours de son étude. *Elle présente une volonté de transformation de l'objet de recherche plus affirmée que la recherche-action. [...] La recherche intervention fait place à une approche ingénierique [...] qui se distingue de l'approche clinique* (Rasolofo-Distler & Zawadzki, 2011)

Il ne s'agit donc pas seulement d'une posture en recherche, mais bien d'une méthode qui amène à repenser les moyens de valider les connaissances produites. L'objet est construit par le chercheur et ses résultats se trouvent autant dans la forme que prend l'expérimentation que dans son aboutissement.

¹⁴ Fana Rasolofo Distler - Maître de conférences en Sciences de Gestion, Université de Lorraine

¹⁵ Cindy Zawadzki - Enseignant-chercheur en contrôle de gestion, Ecole de management de Reims Management

¹⁶ Albert David - professeur à l'Université Paris-Dauphine ; responsable du Master Management de la Technologie et de l'Innovation - fondateur du " Cercle de l'Innovation" (plateforme collaborative de conception et de soutien à des programmes de recherche sur l'innovation managériale)

2.4.2 L'observation participante.

L'observation participante est avant tout un ensemble *d'activités à réaliser par l'observateur : être présent, s'adapter, observer, et enregistrer*. L'observation participante consiste donc en l'observation de faits à regrouper en phénomènes. Cette méthode de recherche paraît particulièrement adaptée à la recherche opérationnelle. *Il semble difficile de s'orienter vers de l'observation non participante puisque la signature d'une CIFRE tripartite implique que le chercheur participe au fonctionnement de l'entreprise en y occupant une fonction*. Il y a toutefois des risques à maîtriser dans ces situations.

- *La prééminence du rôle d'acteur sur celui de chercheur*
- *Les aléas du regard entraînant une sélection des faits*
- *Une interaction et une participation impliquées risquant de déformer les perceptions du chercheur*

(Rasolofo-Distler & Zawadzki, 2011)

C'est donc ici le contexte qui va forger la méthode de recherche. Il devient alors important de gérer les biais scientifiques générés par l'observation participante. C'est principalement le regard du chercheur qui est questionné. Contrairement à la recherche intervention, il convient de se raccrocher fortement à un cadre théorique pour s'assurer de pouvoir comparer des résultats aux postulats de départ.

2.4.3 L'Etude de cas

L'étude de cas est sûrement l'un des concepts les mieux identifiés. Il n'est à priori pas propre à la recherche-action, mais il se déploie fortement dans les milieux de recherche associés au monde de l'entreprise. Elles sont parfois la base méthodologique des travaux de fin d'étude et mémoires de masters constituant les premières œuvres scientifiques d'un chercheur. Elle est souvent associée à l'activité de l'ingénieur. L'étude de cas se définit dans le monde scientifique comme *une recherche empirique qui étudie un phénomène contemporain dans un contexte réel, lorsque les frontières entre le phénomène et le contexte n'apparaissent pas clairement et dans lequel on mobilise des sources empiriques multiples* (Yin, 1989, p. 25).

L'étude de cas prends son sens dans les situations suivantes :

- *Tester une théorie (avec l'objectif de la confirmer, de la réfuter ou de la compléter)*
- *Révéler un phénomène non rare mais auquel la communauté scientifique a difficilement accès*
- *Lorsque le cas étudié est rare ou unique.*

(David, 2005)

L'étude de cas est donc aussi adaptée à des terrains opérationnels, mais ne supposent pas que le chercheur agisse sur son objet, ni qu'il construise lui-même le cadre théorique nécessaire à son observation. Cette méthode de recherche est possible lorsqu'il s'agit de produire des connaissances supplémentaires dans une discipline scientifique solidement constituée d'un point de vue épistémologique.

3. Vers une méthode de recherche projet entre l'étude de cas et l'observation participante.

Après avoir observé différents modes de recherche action, nous pouvons fixer notre propre méthode de recherche. Pour rappel, deux conditions influent fortement sur cette méthode. D'abord la nécessité de construire un terrain d'observation, car l'objet étudié est difficilement accessible. Ensuite la nécessité de le coconstruire avec les acteurs d'un milieu professionnel.

En nous appuyant sur les postulats de la recherche en design et en architecture, nous savons comment orienter notre recherche sur la conception d'objets. Nous devons alors prendre en considération l'amont des projets, c'est-à-dire les hypothèses qui vont permettre l'émergence des processus de conception qui y sont associés. Nous le faisons sur la base de deux champs explorés « mécatronique de conception » et « mécatronique de construction », avec les règles de conception qui en ressortent et que nous devons confirmer.

Nous devons veiller à ce que nos résultats de recherche trouvent un écho au sein de la communauté scientifique. Nous pensons donc nous orienter vers des modes de recherche plus installés que la recherche-projet ou la recherche-création, tout en gardant certains de leurs principes. Les recherches finalisées, impliquées ou appliquées auraient pu constituer un bon socle. Il nous a semblé que ces méthodes de recherche sont particulièrement indiquées pour des objets interdisciplinaires tels que celui que nous souhaitons étudier. Elles sont pourtant très liées aux sciences humaines et notamment aux sciences sociales. Ceci nous pousserait à basculer notre recherche dans un autre ancrage scientifique.

Nous choisissons alors des méthodes plus neutres, au sein des sciences de gestion. L'observation participante permet de répondre à notre nécessité d'interaction avec le milieu que nous souhaitons observer. Elle permet aussi de déployer notre méthode de recherche-projet. Mais comme nous l'avons vu cette méthode peut causer des biais tels que la prééminence du rôle d'acteur sur celui de chercheur, des aléas du regard entraînant une sélection des faits et donc une déformation de notre perception. Nous souhaitons donc transformer ces observations participantes en un autre mode : L'étude de cas. Pour transformer une observation participante en cas d'étude nous devons nous assurer de faire intervenir un socle théorique. C'est bien sûr les sciences de la conception qui nous l'apporterons.

Pour résumer, le mode privilégié de notre recherche est la constitution d'observations participantes sous forme de projets collaboratifs. Lorsque ces projets deviennent des activités autonomes, nous pouvons opter pour une méthode d'étude de cas. Nous contrôlons les biais via un prisme de lecture choisi au sein des sciences de la conception ainsi que dans l'état de l'art sur les pratiques de conception de la robotique en architecture. Nous verrons dans la présentation de nos résultats que le passage entre étude de cas et observation participante fut compliqué notamment face à l'émergence de nombreuses opportunités d'observations. Néanmoins ce point ne fut pas insurmontable et produisit une grande quantité de cas à étudier qu'il a fallu classer au fil de cette recherche.

4. Synthèse

Nous venons de faire état des différentes déclinaisons de la Recherche-Action et de leurs liens avec des ancrages disciplinaires variés. Nous retrouvons des formes issues des sciences humaines classiques telles que la sociologie et l'Anthropologie. Ces cadres nous ont semblés particulièrement figés et demandent une rigueur que nous ne pourrions appliquer dans les conditions de notre recherche. Ils impliquent par ailleurs l'exploitation de théories scientifiques éprouvées, qu'il s'agit d'enrichir. Or nous ne nous trouvons pas totalement dans ce cas, car notre socle théorique n'a pas vocation à être falsifié dans cette recherche.

Nous avons pu voir que la recherche en Architecture peut se raccrocher à de nouveaux socles méthodologiques rendant possible un travail réflexif sur des activités de conception portées par le chercheur lui-même (Recherche-Projet et Recherche-Création). Ces méthodes semblent intéressantes pour notre projet de production de connaissances, mais pourraient être soumises à caution. Nous ne pouvons prendre ce risque dans le cas d'une recherche ayant des implications industrielles. Nous appréhendons aussi l'émergence d'une confusion entre projet de recherche et projets conçus, tant dans la rédaction que lors des expérimentations.

Nous nous sommes donc orientés vers des méthodes définies pour les sciences de gestion. De nombreuses options pouvaient correspondre à nos besoins, mais nous avons pris le parti de mener ce travail en observation participante pour constituer des cas d'étude. Il s'agira de provoquer si besoin des situations de conception de la mécatronique pour les chantiers par différentes méthodes. D'en observer les résultats et de les analyser en gardant à l'esprit les conditions dans lesquelles ils ont été générés.

Nous pouvons à présent définir les protocoles expérimentaux pour la génération et l'observation de ces cas d'étude dans le chapitre suivant.

Chapitre 3. Protocoles expérimentaux

Dans les chapitres précédents, nous avons exposé les conditions dans lesquelles cette recherche s'est déroulée. Nous avons évoqué la nécessité d'investir le terrain de la conception pour la comprendre. Nous avons aussi vu la nécessité de provoquer l'apparition des situations de conception que nous souhaitons observer. Ce type de recherche-action est tout à fait envisageable et est permise par de nombreux cadres disciplinaires. Nous l'avons vu dans le chapitre précédent avec la sélection du cadre de l'observation participante dans le but de constituer des cas d'étude. Ces cas d'étude sont en quelque sorte des situations de conception que nous allons pouvoir analyser.

Le but de ce chapitre est d'exposer les protocoles expérimentaux que nous avons construits. Nous y verrons les grands principes que nous souhaitons respecter avant de décrire les cadres expérimentaux. Nous reviendrons sur nos hypothèses et les questionnements associés dans les quatre situations de conception rencontrée sur le thème de la mécatronique nous les chantiers. Puis nous présenterons la démarche de réduction de ces observations grâce aux sciences de la conception.

1. Principes généraux : Exploration et analyse d'une pratique

Nous intégrons une entreprise de construction au sein de laquelle nous allons porter notre problématique de recherche et la partager avec les acteurs de la construction qui la composent. Elle devient alors une aventure collective mais surtout un cadre expérimental partagé. La question ne prend évidemment pas le même sens dans le monde professionnel et du point de vue scientifique. C'est un élément important pour notre étude car la perception de la mécatronique pour une entreprise de construction va nous renseigner sur la façon dont elle peut être conçue. C'est cette co-construction de concepts qui va nous fournir des connaissances sur la manière dont ils peuvent être générés au sein de ce milieu professionnel.

Cette recherche nous amène à faire du projet. Cette notion est commune en Architecture et nous nous appuyons sur des savoirs pratiques issus de l'Architecture pour la gestion des expérimentations. Ici il s'agit de concevoir les outils mécatroniques destinés à intégrer les chantiers en cherchant la pertinence que les concepteurs de ces chantiers peuvent leur attribuer. Nous verrons que ceux-ci sont fortement nourris par les enjeux de l'Architecture et pas seulement de l'Ingénierie de la construction. Nous nous appuyons entre autres sur les notions de « mécatronique de conception » et de « mécatronique de construction » que nous mettons en miroir.

Nous avons dans un premier temps exploré la notion de mécatronique de conception. Cette exploration s'est faite à travers des projets d'intégration des outils mécatroniques au sein du milieu étudié. Notre regard s'est porté sur le processus d'intégration de ces outils et les enjeux qu'ils révèlent pour la construction. En effet, parmi nos hypothèses, nous avons envisagé qu'une pratique de la conception instrumentée par la mécatronique serait propice à la génération de concepts de fabrication suivant les mêmes procédés.

En début de recherche nous ne savions pas si la mise en place de notre terrain nous permettrait d'observer des phénomènes autres que ceux associés aux activités instrumentées de la conception. Le

développement de la robotique est coûteux et requiert des connaissances que nous n'avions pas encore acquises. Néanmoins la volonté de l'entreprise d'aller directement vers le développement de la mécatronique de construction, sans passer par le développement de la mécatronique de conception a créé les conditions d'observation dont nous avons besoin. Nous avons donc pu observer une génération de concepts de robotique de construction sous l'angle des problématiques de chantier et sous l'angle de l'adaptation de systèmes mécatroniques avancés pour la construction.

Ces observations ne permettaient pas de spécifier cette pratique et d'expliquer la génération de concepts. Il nous fallait un cadre théorique capable d'analyser les processus de conception et d'en expliquer la structure. Nous avons donc procédé à des analogies entre des éléments issus des sciences de la conception et les phénomènes observés pour leur donner du sens.

1.1. Constitution de cas pour l'observation de la mécatronique de conception et de construction

Notre recherche est censée aboutir à la production de connaissances sur les méthodes de conception de la robotique de construction. Avant de pouvoir faire des postulats théoriques, nous souhaitions observer la structuration d'une pratique associée à la mécatronique au sein d'une entreprise de construction. Nous avons constitué quatre cas d'études. Deux sur le thème de la mécatronique de conception et deux autres pour la mécatronique de construction.

Ces cas d'études sont faits en observation participantes mais avec un degré d'implication différent, suivant nos capacités d'intervention sur l'activité du milieu observé. Pour chacun de ces thèmes nous avons dans un premier temps adopté une posture propositionnelle. Ces propositions sont liées aux hypothèses que nous avons formulé en début de recherche. Nous avons donc proposé des voies d'intégration de la mécatronique de conception pour le prototypage de systèmes constructifs ou de machines de construction. Pour la mécatronique de construction nous avons fait état des connaissances sur les systèmes existants dans la construction et ceux présents dans le monde de la mécatronique pour provoquer soit des choix soit des formulations de concepts.

Dans un deuxième temps nous avons adopté une posture d'accompagnement. Aucun concepteur mécatroniques n'étant présent dans l'entreprise, nous avons dû assumer ce rôle pour répondre à des commandes venant des chantiers et des bureaux d'étude. Nous avons tout de même pu déléguer ce rôle sur les phases impliquant la conception de systèmes mécatroniques avancés. Ce sont ces phases qui nous ont permis d'observer des formulations de concepts se rapportant à une activité réelle.

1.2. Utilisation des sciences de la conception comme prisme d'analyse

Les sciences se construisent sur la notion de généralisation et de transmissibilité des connaissances produites. Les résultats de nos observations sont difficilement généralisables. Ils font état d'une situation donnée, dont les paramètres pourraient changer suivant le contexte. Nous avons vu que certains aspects de la recherche action recommandent de gérer le rapport entre théorie et cas observés pour structurer ces connaissances. Nous devons donc y associer une partie d'analyse grâce au prisme des théories de la conception. Cette étape est le dernier palier pour la constitution de méthodes d'intégration de la mécatronique sur chantier.

Nous avons donc modélisé nos processus de conception en procédant par analogie entre des modèles de conception établis scientifiquement et les faits que nous avons observés sur le terrain. Cette approche fut compliquée car la position de concepteur adoptée dans le cadre de notre recherche nous

demandait de prendre un recul suffisant. Nous avons donc réalisé cette phase d'analyse en toute fin de recherche en nous basant sur les notes prises lors des phases pratiques.

Nous n'avons pas pris l'ensemble des cas observés. Certains de ces cas se sont révélés peu féconds concernant la production de concepts de la part des professionnels de la construction. C'est donc sur ceux ayant permis d'initier véritablement un processus de conception qui vont nous intéresser. Nous avons donc réalisé cette analyse sur un cas d'étude concernant la mécatronique de conception et un cas d'étude concernant la mécatronique de construction.

1.3. Résumé de la méthodologie

Nous avons produit une synthèse permettant de rendre compte de manière plus sensible notre méthodologie de recherche (Figure 85). La liste des expérimentations est longue. Elle reflète la forte activité au sein d'une entreprise générale et les tâtonnements que nous avons effectué pour cadrer notre problématique. Ainsi nous avons pu mener et observer de nombreux cas d'études sur les thèmes de la mécatronique de conception avec l'intégration de la fabrication additive et des microcontrôleurs au sein d'une entreprise de construction. Nous avons aussi pu générer des concepts de mécatronique adaptés à la construction et observer des générations de concepts venant des chantiers. Nous nous sommes appliqués à synthétiser ces cas d'étude en nous appuyant constamment sur nos questions de recherche. Enfin pour structurer ces observations nous nous sommes appuyés sur les sciences de la conception.

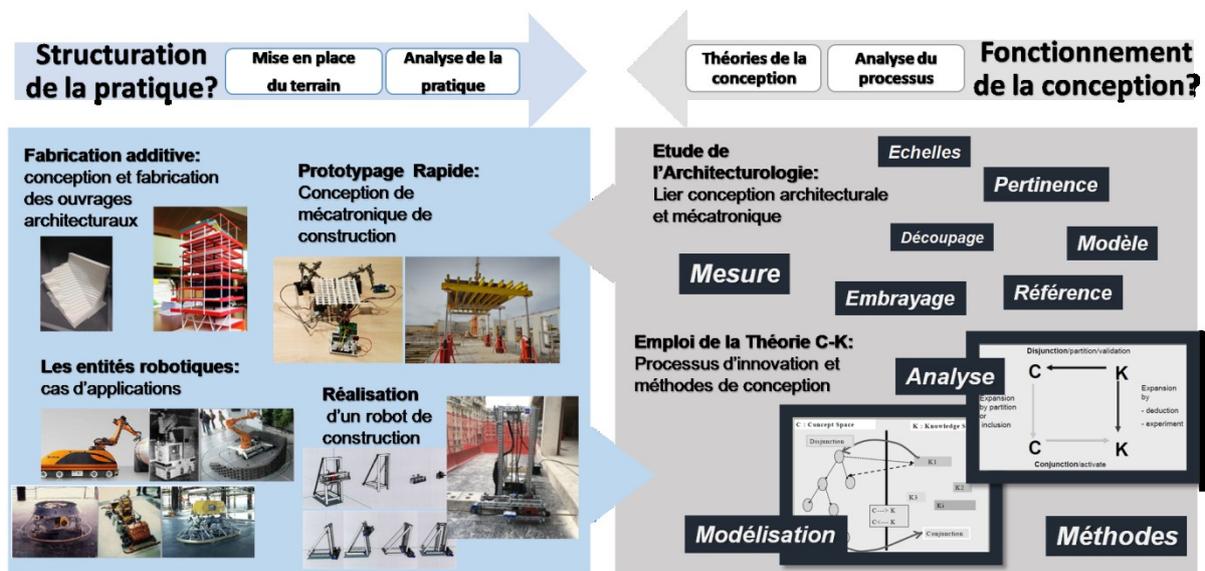


Figure 85 Méthode de recherche : conception/observation/analyse

2. Description des expérimentations

2.1. Mécatronique de conception et génération de concepts pour la fabrication.

Conditions générales :

- Objectif : Valider l'existence d'une génération de concepts pour la robotique de construction par l'utilisation des outils de prototypage rapide.
- Acteurs impliqués : Services d'ingénierie technique, services travaux, études de prix.
- Matériel support : Outils de prototypage rapide (sélectionnés au cours des expérimentations)
- Observations générales : Modes de sélection d'outils de prototypage rapide. Usage de ces outils par des acteurs de la construction. Evocation de concepts associés à la robotique de construction.

Cas d'étude A : Les machines à commande numériques en étude de projet

Objet : Connaitre les phénomènes d'intégration des machines à commandes numériques dans une entreprise de construction.

Questionnements et hypothèses : Comment constituer une pratique autour des machines à commandes numériques dans la conception de la construction ? Ces machines sont employées dans des processus de conception architecturale. Dans la littérature scientifique sur le sujet nous constatons qu'elles permettent de générer des concepts de fabrication (Meyer, 2017). Peuvent-elles influencer sur la conception des modes constructifs d'une entreprise générale ?

Mode opératoire : Nous avons accompagné les services d'ingénierie d'une entreprise de construction dans la sélection et l'intégration d'une machine à commande numérique. Pour cela nous avons fait des propositions sur l'usage de ces machines. A l'issue de ces phases d'accompagnement une machine de fabrication additive par fixation a été sélectionnée. Nous avons alors pu observer un usage sur des cas concrets par les services d'études de prix.

Observations : Les critères et les modes de sélection d'une machine à commande numérique. Les cas d'usage générés dans le cadre d'une activité de conception de la construction. L'influence de ces usages sur les modes constructifs.

Durée de l'expérimentation : 3 mois d'installation. 24 mois continus d'observation.

Cas d'étude B : Microcontrôleurs et prototypage de robots de construction

Objet : Evaluer la capacité à concevoir des prototypes de systèmes mécatroniques pour la construction grâce aux microcontrôleurs.

Questionnements et hypothèses : Comment constituer une pratique autour des microcontrôleurs dans la conception de la construction ? Ces outils permettent de concevoir rapidement des systèmes mécatroniques. Dans la littérature scientifique nous observons que des pratiques se forment en conception architecturale grâce à ce type d'outils (Meyboom et al., 2010). Ils permettent de produire des concepts d'architecture mobile, ayant parfois des fonctions structurelles. Ces outils peuvent-ils être utilisés lors des phases de conception de la construction ? Permettent-ils de générer des concepts de robotique de construction ?

Mode opératoire : Nous avons produit des concepts réduits de systèmes mécatroniques pour le chantier. Cette partie fut associée à des phases d'apprentissage de l'usage des microcontrôleurs. Ceci limite nos observations aux connaissances que nous avons pu acquérir dans le domaine de la mécatronique au moment de cette expérimentation. Pour valider la pertinence de ces phases de production de concepts, nous les avons confrontés aux acteurs de la construction (tous services confondus). Cette confrontation s'est faite par l'organisation de groupes de travail de 4h avec des opérationnels constituant un panel représentatif.

Observation : La capacité de concevoir des systèmes de robotique de construction en prototypage rapide. Les composantes minimums de ce type d'activité. La pertinence attribuée par les acteurs de la construction.

Durée de l'expérimentation : 1 mois d'installation. 3 mois de confrontation.

2.2. Les phénomènes de conception associés à la mécatronique de construction

Conditions générales :

- Objectif : Valider les règles de conception par inventaire et par exploration des champs de la mécatronique.
- Acteurs impliqués : Services d'ingénierie technique, services travaux, études de prix. Intégrateur en robotique (dans le cadre d'un partenariat de recherche)
- Matériel support : Aucun
- Observations générales : Modes de sélection de thèmes de robotique de construction. Génération de concepts par les chantiers.

Cas d'étude C : Des projets de recherche en robotique de construction

Objet : Observer la production de concepts pour la mécatronique de construction par l'adaptation de concepts de mécatronique avancée.

Questionnements et hypothèses : Comment amener des concepts de mécatronique sur des problématiques de construction ? Dans cette expérimentation nous souhaitons explorer la génération de concepts de robotique de construction par l'emploi de thématiques avancées de mécatronique. Cette proposition est issue de nos observations dans la littérature scientifique spécialisée dans la robotique de construction (Arai, 2011) (Bock & Linner, 2015).

Mode opératoire : Montage de projets de recherche en robotique de construction. Ces projets se sont fait en partenariat avec une entreprise d'intégration de robotique. Nous avons généré des concepts sur la base de technologies robotiques encore à l'état de recherche. La participation de collaborateurs présents au sein des bureaux d'étude et sur les chantiers a permis de fixer ces concepts pour valider leur pertinence.

Observations : La nature des projets de robotique de construction générés par cette règle de conception. La capacité à fixer ces concepts pour correspondre à des besoins de la construction.

Durée de l'expérimentation : 3 mois continus en conception/concertation.

Cas d'étude D : La robotique de construction initiée par les chantiers

Objet : Mesurer la correspondance entre l'état de la mécatronique de construction et les besoins des chantiers. Connaître la nature des concepts de mécatronique de construction générés par les chantiers.

Questionnements et hypothèses : Comment concevoir un chantier intégrant de la mécatronique ? Nous avons repéré deux grands modes de conception à travers notre état de l'art. Le premier serait un choix sur la base d'inventaires de la robotique de construction (IAARC, 1998), le deuxième serait la production de concepts sur la base de la transformation des modes fabrication par la robotique (Bock & Linner, 2015).

Mode opératoire : Accompagnement des opérationnels des chantiers dans la formulation de concepts de mécatronique de construction. Une première étape consista à présenter des inventaires de robotique de construction existante aux services chargés de concevoir les chantiers. Nous espérons voir s'opérer des choix correspondant aux réalisations dont ils ont la charge ou la production de concepts innovants.

Nous avons observé leurs formulations de concepts afin d'en comprendre la nature, et nous avons fait des propositions de systèmes mécatroniques associés pour qu'ils en valident la pertinence. Nous souhaitons observer la capacité de ces générations de concept à se concrétiser. Ainsi, dans un troisième temps, nous avons accompagné deux de ces projets jusqu'à leur prototypage.

Observations : La nature des projets de chantier mécatronique générés par ces règles de conception. La capacité à fixer ces concepts pour correspondre aux réalités de la mécatronique.

Durée de l'expérimentation : 1 mois de préparation. 24 mois d'observation participante. 6 mois de phase de prototypage.

2.3. Modélisation des processus de conception et proposition de méthodes de gestion

Conditions générales :

- Objectif : Produire des connaissances structurées des processus de conception observés lors des cas d'étude sur la mécatronique de conception et la mécatronique de construction. Déterminer des règles de conception pour la robotique de construction
- Acteurs impliqués : -
- Matériel support : Théories et modèles de la conception (Architecturologie et Théorie C-K). Traces de conception des cas d'études.
- Observations générales : Structuration des processus de conception. Définition d'éléments généralisables.

Lier conception architecturale et mécatronique de construction

Objet : Déterminer des règles de conception pour la robotique de construction en liens avec l'Architecture.

Questionnement et hypothèses : Comment définir des caractéristiques communes aux processus de conception architecturale et ceux de la robotique de construction ? Nous savons que l'Architecturologie est employée dans l'analyse de pratiques de conception en Architecture. Elle permet aussi de spécifier et donc de modéliser ces processus. Comment pouvons-nous appuyer sur cette discipline pour l'analyse de nos projets ? Peut-on en déterminer des règles de conception ?

Mode opératoire : Nous avons analysé les processus de conception présents au sein du cas d'étude B (microcontrôleur et prototypage de robots de construction). Pour cette analyse nous avons procédé à une analogie entre les éléments caractéristiques de l'Architecturologie et les phénomènes constatés lors du prototypage de systèmes mécatronique pour la construction.

Observation : Eléments définis en Architecturologie dans la définition technique des systèmes mécatroniques de construction. Récurrence de ces éléments dans différents projets.

Maitriser la conception de la mécatronique de construction

Objet : Déterminer des règles pour structurer la conception de la robotique de construction.

Questionnement et hypothèses : Comment gérer un projet de robotique de construction, du concept jusqu'à sa concrétisation ? La théorie C-K permet de modéliser des processus de conception à travers la division des connaissances et des concepts. Elle est employée notamment dans l'aide à l'innovation et l'analyse de projets de divers champs de l'industrie et des services. Comment appliquer cette théorie pour la modélisation des projets de robotique de construction ? Quelles analyses pouvons-nous faire sur les processus de conception que nous avons observés ?

Mode opératoire : Nous avons analysé le processus de conception d'un projet de prototypage au sein de notre cas d'étude D (Robotique de construction initiée par les chantiers). Pour cette analyse nous avons reconstruit un processus de conception en identifiant les différentes phases permettant de passer de la génération de concepts à leur prototypage.

Observations : Structuration des concepts et des connaissances dans un projet de robotique de construction. Eléments déterminants dans la concrétisation du projet.

3. Synthèse

Nous avons décrit ici le cadre expérimental avec lequel nous avons souhaité déployer cette recherche. Il est constitué de quatre cas d'étude mettant en place des situations de conception de la mécatronique pour les chantiers et deux analyses via les sciences de la conception. Les cas d'étude sont des situations de conception impliquant des acteurs de la conception de la construction.

Les deux premières situations de conception se font sur le thème de la mécatronique de conception. Au départ de cette recherche, il n'existe pas de pratique associée aux machines à commande numériques ou à la micro-électronique sur le terrain que nous investissons. Nous avons dû accompagner l'intégration de ces outils. C'est cette intégration que nous allons observer et sa pertinence vis-à-vis d'un développement d'une pensée de la mécatronique pour la construction.

Les deux situations suivantes concernent la mise en place de projets de robotique de construction. Il s'agit d'opportunités d'observation que nous n'avions pas anticipées et que nous avons intégrées à notre cadre d'étude au cours de cette recherche. Le temps du chantier et celui du développement de l'industrie ne pouvaient permettre d'envisager un développement lent via la mécatronique de conception. Nous avons ainsi pu observer ou accompagner le montage de projet de mécatronique de construction, soit issus de problématiques de chantier, soit issus de projets industriels en partenariat avec des entreprises de robotique. Nous allons décrire ce qui caractérise ces situations, ce qui les structure et ce qu'elles produisent.

Enfin nous présentons notre projet de réduction de nos observations via les sciences de la conception. Celui de lier conception architecturale et conception des robots de construction, et celui de maîtriser ces processus de développement. Pour cela nous ferons référence à quelques exemples vus en mécatronique de conception et mécatronique de construction. Nous y appliquerons des analyses basées sur les modèles de l'Architecturologie et de la théorie C-K.

Partie 3. Introduction de la mécatronique dans la conception du chantier

Cette partie présente les résultats d'observation et d'analyse

Y sont traités :

- *Les études sur l'intégration mécatronique de conception en entreprise de construction*
- *Les études sur la génération de concepts de mécatronique de construction par les chantiers*
- *Les analyses et modélisation des processus observés grâce aux théories de la conception*

Chapitre 1. Mécatronique de conception : un support pertinent pour la génération de concepts de robotique de construction ?..... 123

Chapitre 2. Projets de robotique de construction : Convergence entre concepts mécatroniques et problématiques de chantiers..... 161

Chapitre 3. Vers des méthodes inspirées des sciences de la conception..... 187

Chapitre 1. Mécatronique de conception : un support pertinent pour la génération de concepts de robotique de construction ?

1. Introduction

La mécatronique peut-elle devenir l'instrument de sa propre conception dans le cadre de la construction ?

La conception des systèmes mécatroniques passe par des étapes de prototypage. Comme en architecture, plusieurs médiums permettent de mettre en forme, d'analyser et de figer les caractéristiques de ces systèmes. Des outils de simulation et de modélisation interviennent fréquemment. Ils auraient pu être au cœur de cette recherche, mais c'est un autre médium qui nous intéresse ici. Les outils de prototypage rapide, tels que les machines à commande numériques ou les microcontrôleurs permettent de produire des maquettes de systèmes mécatroniques, ou simuler leurs modes de production à échelle réduite. Cet aspect nous a intéressé car nous pensons pouvoir le rapprocher des pratiques de production de maquettes dans le monde de l'architecture. Ces supports de conception mécatroniques pourraient alors s'intégrer dans les processus de conception de la construction.

Dans ce chapitre nous cherchons à valider l'hypothèse de l'emploi d'outils de prototypage rapide comme support de conception pour des systèmes mécatroniques de construction. Nous avons procédé par étapes, avec l'évaluation des machines à commandes numériques, puis des microcontrôleurs. Nous avons observé le processus d'intégration de ces outils dans un milieu de conception de la construction, en entreprise générale. Nous nous sommes intéressés aux phénomènes liés à l'appropriation de ces outils. Les moyens développés pour évaluer la pertinence de ces outils soit sur chantier, soit dans une pratique de conception des chantiers.

2. Les machines à commande numériques en étude de projet

Nous souhaitons observer les phénomènes associés à l'intégration des machines à commandes numériques dans une entreprise de construction. Ce cas d'étude a pour objectif de faire apparaître les pratiques liées à la mécatronique de conception dans un environnement professionnel connexe à celui de l'architecture. Nous savons que ces machines sont employées dans des processus de conception architecturale et qu'elles permettent de générer des concepts de fabrication (Meyer, 2017). Peuvent-elles avoir le même impact sur la conception des modes constructifs d'une entreprise générale ?

Sur le terrain de recherche dans lequel nous nous insérons, les pratiques que nous souhaitons observer ne préexistent pas. Nous avons dû adopter une méthode de recherche-action, consistant en un accompagnement des services d'ingénierie d'une entreprise de construction dans la sélection et l'intégration d'une machine à commande numérique.

Nous allons décrire ici les phases de ce processus d'introduction d'outils mécatroniques dans la conception du chantier. Nous présentons ce processus bien en amont de la détermination d'un usage car il nous renseigne sur les modes d'appropriation de ces instruments et nous permet de connaître des usages potentiels de ces machines au-delà de leurs caractéristiques techniques.

Nous verrons donc dans un premier temps le processus de sélection d'une machine à commande numérique. Puis nous verrons les premiers cas d'usages générés et l'analyse que nous pouvons en faire. Nous chercherons à déterminer les critères et les modes de sélection d'une machine à commande numérique qui sont pertinents et reproductibles. Puis les cas d'usage pertinents dans le cadre d'une activité de conception de la construction. Nous mettrons ces résultats en perspective avec nos hypothèses de départ sur l'influence de ces usages sur les modes constructifs.

2.1. Le choix d'une machine.

La volonté de l'entreprise, terrain de notre étude, de se tourner vers « l'impression 3D », nous donne l'opportunité d'observer la genèse de l'intégration de ce type d'outils dans une activité professionnelle liée à la construction. Cette volonté est liée à une dynamique d'innovation mais les cas d'applications sont alors inconnus. Il y a par ailleurs une méconnaissance de ces technologies et pas de retours d'expérience sur leur fonctionnement dans le cadre d'une entreprise générale. Au moment de cette étude, la fabrication additive est encore en développement dans le domaine de la fabrication en béton et les imprimantes 3D de bureau sont présentes dans des milieux professionnels et académiques très circonscrits. Ce projet est soumis à des contraintes économiques et doit atteindre des objectifs de rentabilité en intégrant les pratiques de l'entreprise notamment autour de services d'étude et d'ingénierie. Il y a une différenciation de ces services par rapport à ceux des chantiers ce qui peut nous éloigner de notre problématique. Ces services ont pour fonction principale d'évaluer les coûts et les risques des projets. L'organisation de la production ne se fait que dans les phases suivantes, au sein de services directement liés à chaque chantier. Néanmoins nous pensons observer plus d'occurrence d'activité de conception, à cette échelle. De plus, les services d'étude et d'ingénierie occupent un rôle d'articulation entre la maîtrise d'œuvre, la maîtrise d'ouvrage et le chantier.

Nos hypothèses de départ se font sur la base des pratiques observées dans le monde de la mécatronique de conception. Nous pressentons le passage de réflexions sur la fabrication additive pour la conception vers des réflexions sur la fabrication des ouvrages.

Lors de cette phase de l'étude nous sommes passés par un processus de sélection d'une machine. Le choix de la fabrication additive n'était pas une évidence, tant du point de vue de nos hypothèses de recherche que de celui des activités sur lesquelles ces outils allaient être employés. Nous allons décrire les étapes de sélections, les moyens d'évaluation et de compréhension des technologies accessibles sous forme de machine à commande numérique.

Nous commençons par un inventaire des machines existantes. Inventaire des familles d'outils de type machine à commandes numériques. Cet inventaire nous pousse déjà à questionner l'usage futur, même si la sélection effective ne nous a pas permis d'explorer l'usage réel de chacune. Pour imaginer ces cas d'applications nous avons notamment appuyé notre réflexion sur les pratiques observées dans

l'univers de la mécatronique de conception, mais surtout d'après les retours des concepteurs de la construction impliqués lors des phases de sélection.

2.1.1 Revue d'inventaire et projections sur l'usage.

Les machines à commandes numériques sont principalement basées sur des systèmes de robots parallèles ou cartésiens. Les outils placés sur ces machines définissent leurs applications par les procédés de fabrication qu'ils permettent. Nous présentons ici le panel des types de machines présentées avec les propositions d'utilisation associées. Cet inventaire fut fait sur la base de l'observation de pratiques instrumentées de la conception architecturale, grâce aux machines à commandes numériques, dans des FabLab et des écoles d'architecture.

Machines de découpe : une production indirecte ?

Le premier exemple fut la découpe de mousse par fil chaud installée sur un robot parallèle (Figure 86). Cette technique permet de découper des blocs de polystyrènes. Ces machines produisent des formes simples en apparence car le fil ne se déplace que sur deux axes. Néanmoins ces formes peuvent devenir complexes grâce à un enchaînement d'opérations de découpages. Nous supposons qu'elles peuvent trouver des applications dans la production de prototypes de systèmes de coffrage, de remplissage, d'isolant, d'échafaudage, de fond de moule. Ces découpes peuvent s'imaginer sur le même matériau à plus grande échelle, mais nous savons que des analogies sont possibles avec la découpe de pierre par exemple.



Figure 86 Machine de découpe au fil chaud (G) Exemple de réalisations (D)

Les technologies de découpe laser ou jet d'eau sont probablement les plus répandues au sein des parcs de machines de prototypage rapide (Figure 87). Ces procédés sont reconnus pour leur rapidité et leur finesse de production ainsi que leur facilité de prise en main. La programmation de la découpe se fait sur la base de patrons, dessinés en deux dimensions. Nous avons pu observer des activités de conception basées sur des principes d'assemblage au sein de Fablab ou d'école d'architecture. Ce type d'activité pourrait être envisagé en bureau d'étude pour la conception d'éléments constructifs.

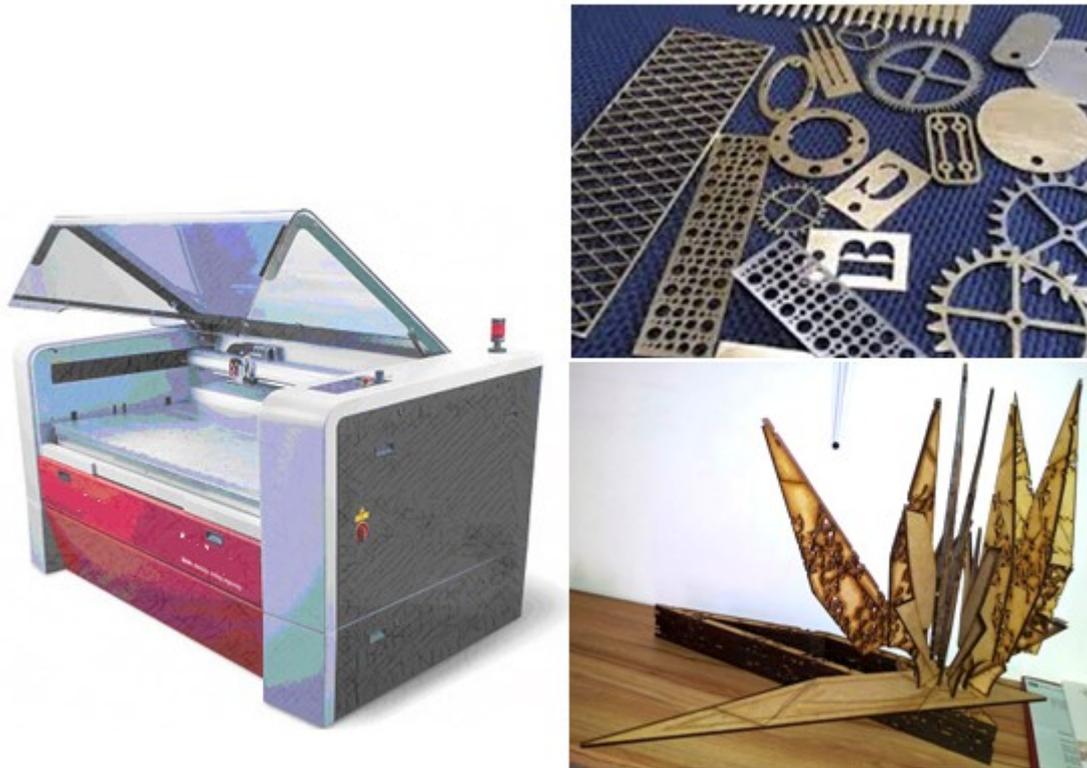


Figure 87 Machine de découpe laser(G) Exemple de réalisations (D)

Produire en trois dimensions

Le fraisage est un procédé de fabrication courant dans l'industrie. Son adaptation sur des machines à commande numérique en fait un parfait outil d'usinage, le plus souvent sur des pièces métalliques. Les fraiseuses numériques sont aussi employées sur d'autres matériaux et permettent la production de prototypes ou de maquettes par soustraction de matière (Figure 88). Les formes générées sont en trois dimensions, mais nous parlons de 2,5D car le travail sur l'objet ne se fait que sur une face. Il existe des procédés de fraisage numériques qui emploient plus de trois axes de déplacements, de l'objet ou de l'outil, mais rarement observables en dehors de l'industrie. Même contraintes, les formes permises par cet outil et sa capacité de traiter différents matériaux ouvrent un grand champ de prototypages de formes sur différentes matières. A ce stade de la recherche, nous ne voyons pas de liens évidents avec le chantier. En effet, nous avons pu observer peu d'opérations de soustraction de matière dans la production de bâtiment, à part en phases de démolition. Néanmoins, l'introduction de cet outil pourrait ouvrir la voie à de nouveaux procédés de fabrication.

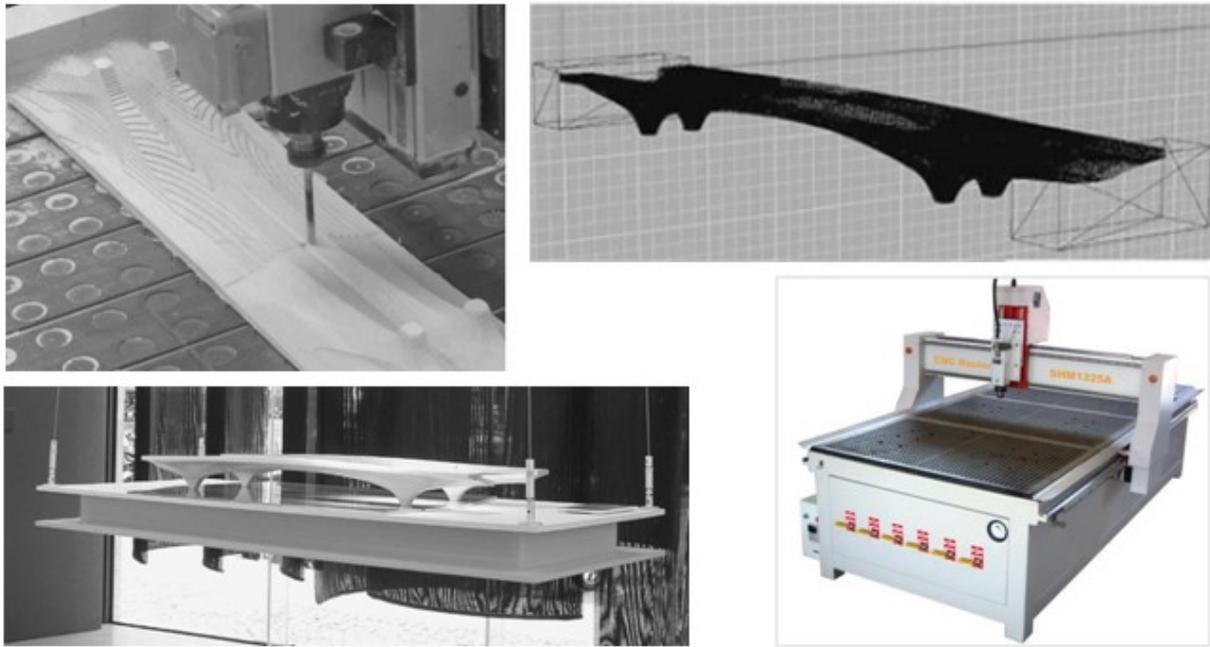


Figure 88 Fraiseuse numérique(D) Exemple de réalisations (G)

Nous arrivons enfin à la fabrication additive, plus communément appelée impression 3D. Deux techniques sont identifiées. Des machines à fabrication par concrétion et des machines à fabrication par fixation de matière. Récemment démocratisées, les imprimantes 3D que nous connaissons sont le plus souvent des machines à concrétion (Figure 89). Elles ont l'avantage d'être accessibles d'un point de vue économique et de prise en main. Malgré tout, ce type de technique n'est pas le plus complet en termes de production de forme. En effet, elle fonctionne par dépôt de matière en couches successives, ce qui oblige le concepteur de l'objet à réfléchir au support des formes qu'il dessine. Ce problème est pallié par différents procédés, mais altère fréquemment la qualité de la production.

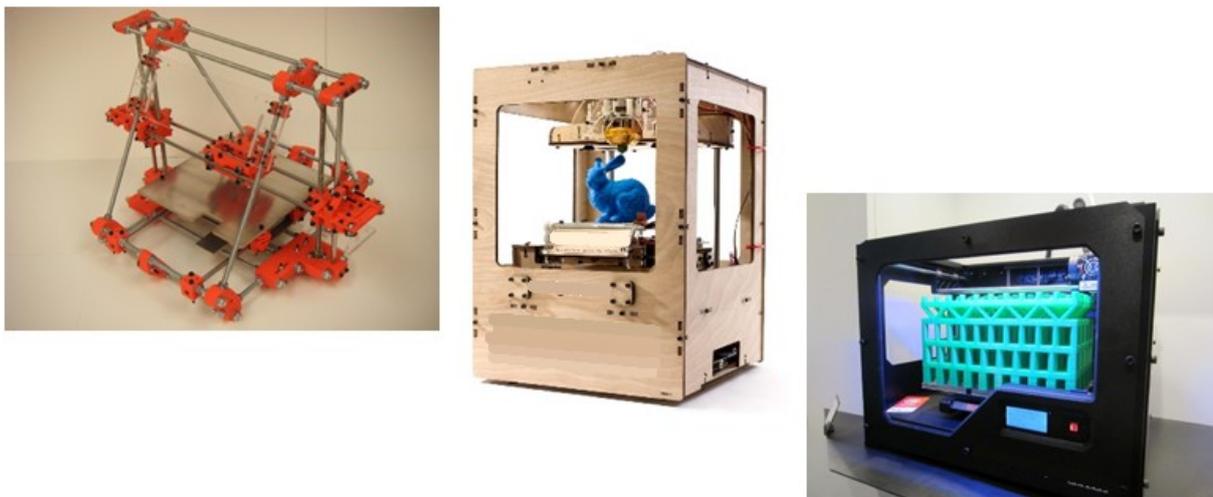


Figure 89 Imprimantes 3D par dépôt de fil

Les machines à fabrication par fixation n'ont pas ce souci. Elles fonctionnent par ajout de couche de matériaux liquides ou sous forme de poudre, puis par fixation des parties à conserver sur l'objet. Le support est donc intégré lors de la fabrication, ce qui permet d'envisager toutes les formes imaginables. L'exemple que nous présentons (Figure 90) permet aussi d'y ajouter des couleurs. Alors,

devant cet éventail des possibles, quelles réflexions pouvons-nous avoir concernant les usages, puisqu'ils semblent illimités ? Création de maquettes physiques, mobiles, étude du comportement des matériaux, de la couleur, des échelles ? nous avons dû prolonger cette réflexion dans les phases suivantes de cette recherche, lors du déploiement



Figure 90 Imprimante 3D par fixation de poudre(G) Exemple de réalisations(D)

2.1.2 Evaluer pour décider : perception, calcul, modélisation.

La présentation des techniques de fabrication, vues précédemment, fut le préalable d'une phase de sélection. Cette sélection ne s'est pas faite sur la seule base de cet inventaire, puisqu'il s'agit d'une exploration de l'inconnu, tant du point de vue des techniques que des usages potentiels. Les futurs usagers ont eu besoin d'éléments supplémentaires pour se décider. Nous constatons alors, un manque de projection dans les usages liés à ces outils. Nous avons dû explorer des critères de sélection déportés de l'usage. Par exemple la qualité de production, le temps de réalisation, la complexité des modèles à réalisés, le type de matériaux employables et leur approvisionnement, devaient être maîtrisés. Nous allons présenter les moyens mis en place pour une évaluation de la pertinence de ces outils dans l'activité de l'entreprise générale.

Les performances techniques des machines sont difficiles à appréhender. Par exemple la précision d'impression n'est pas seulement dépendante des capacités de la machine. L'échelle d'impression ainsi que la taille des éléments vont influencer sur le résultat. Pour essayer d'évaluer ces phénomènes, nous avons dû réfléchir à des moyens de les représenter. Ces étapes nous ont amenés à trouver des moyens d'exprimer les processus de travail sur un objet dans un continuum numérique, à décrire des modes de production des formes et à déterminer des degrés de qualité de fabrication suivant les machines étudiées.

La perception du produit

L'observation fut un des premiers moyens d'évaluation. Les futurs utilisateurs de ces machines avaient besoin d'observer des résultats de production pour les comparer. Le choix de l'impression 3D était fortement orienté. Cette condition ne nous a pas permis d'intégrer des objets produits par d'autres types de machines à commandes numériques dans le panel à comparer. Néanmoins nous savons que la perception est un des premiers réflexes envisagés pour faire un choix dans cette situation.

Nous ne sommes pas à l'initiative de cette étape. Nous avons profité d'une présentation commerciale pour observer les remarques faites par nos collaborateurs sur un panel de dix objets imprimés avec différentes machines (Impression par dépôt de fil, par jet, impression à poudre etc...).

Nous n'avons pas d'illustration de ces objets mais ce qui nous intéresse ici, ce sont les commentaires faits sur leurs caractéristiques pour connaître les critères de sélection. Nous les restituons tels quels, indépendamment de l'objet concerné :

- La couleur : « Couleurs fades », « Couleur unie et fluo, c'est dérangeant », « On aura peut-être besoin de transparence »
- La matière : « On voit les stries », « Le matériau est rugueux », « L'objet semble fragile »
- La forme : « L'objet est trop petit », « L'objet est trop simple », « Les angles ne sont pas assez fins », « L'objet est trop épais »

Tous ces commentaires nous ramènent à des projections dans l'usage et plus particulièrement concernant la manipulation de l'objet : « La qualité est trop grossière, je ne peux pas présenter cela à mes clients », « Je ne sais pas comment tenir cet objet et par quel bout le présenter », « Si je dois faire des assemblages, l'objet va-t-il tenir ? »

Ces commentaires viennent principalement des ingénieurs d'affaires. Nous avons pu observer d'autres remarques provenant des ingénieurs qui seront chargés de la production : « Ça met combien de temps à s'imprimer ? » « Ça coûte combien ? » « De quel logiciel j'ai besoin ? »

Nous pouvons conclure que ce mode de sélection est riche, tout du moins si l'on se focalise sur le nombre de commentaires et les univers auxquels ils peuvent renvoyer. Nous aurions pu alors penser que cette étape suffirait à sélectionner une machine. Il apparaît pourtant que le choix reste difficile. Nous pensons que cette incertitude est liée à un manque de projections sur l'utilisation d'un tel outil. Qu'est-ce qui prime ici ? Les propriétés physiques, esthétiques, les dimensions, la complexité des formes ? Certains acteurs espèrent utiliser ces modèles à des fins commerciales, tandis que d'autres envisagent la production d'éléments fonctionnels. Nous allons voir que des étapes supplémentaires, plus théoriques ont été nécessaires à l'évaluation.

Le degré d'imprécision

L'évaluation de la qualité de production d'un objet pouvait être déterminée de manière sensible dès la première étape déjà présentée dans ce mémoire. Mais le panel d'acteurs participant à cette évaluation souhaitait faire appel à des arguments « rationnels ». Or, rationaliser cette évaluation posait problème. Un des problèmes que nous avons rencontrés, vient du fait que les machines à fabrication additive peuvent produire un grand nombre de formes et que la notion de qualité, dans notre cas, dépendait de l'échelle de l'objet. Nous avons fait l'hypothèse que déterminer le niveau de qualité de production revenait à en déterminer les limites. Un des sujets principaux portait sur la précision, où plutôt l'imprécision de la production générée par l'échelle de représentation des objets. C'est ainsi que nous avons représenté sur un graphique le degré d'imprécision généré lors d'une impression en fonction de ces paramètres (Figure 91). Ce graphique fut produit simplement à l'aide des caractéristiques techniques des machines (précision en micron allant de 300 à 30), en rapportant cette donnée à l'écart généré par la mise à l'échelle d'un objet (échelle du 1/10ème au 1/1000ème et taille de l'objet du millimètre au centimètre).

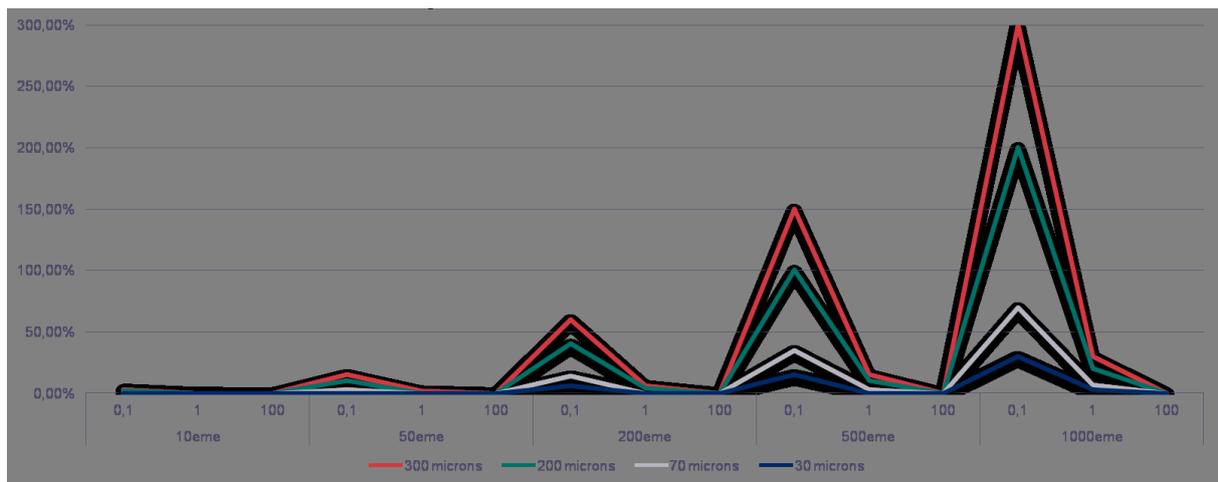


Figure 91 Représentation du taux d'imprécision d'impressions 3D selon l'échelle des modèles et la capacité de la machine

Ce graphique avait pour but de faire apparaître un écart acceptable entre différentes échelles, ainsi qu'un écart acceptable entre différentes tailles d'objets, garantissant le maximum d'applications. Par exemple, en comparant les courbes on remarque le fait que travailler au 1/1000^{ème} avec une machine précise à 30 microns, est aussi pertinent que de travailler au 50^{ème} avec une machine précise à 300 microns. On se rend compte aussi qu'aucune machine de moins plus de 70 microns ne permettra de travailler au-delà du 1/200^{ème}, à moins de ne travailler sur des objets qui seront plus épais que le centimètre.

Ce travail de comparaison fut une étape nécessaire car une partie du panel d'ingénieurs participant à la sélection y fut réceptif. Cela provient sûrement d'une maîtrise de la qualité par le calcul dans leur activité professionnelle. Cette modélisation ne fut néanmoins pas suffisante.

La capacité de production de formes

Nous avons dû évaluer différentes techniques employées par les machines à commande numérique vis-à-vis de la variété de formes possibles. Pour cette étape, la fabrication par fraisage fut réintroduite dans le panel à évaluer. La volonté était de comprendre l'écart entre 2,5D et 3D. Un robot cartésien équipé d'une fraiseuse permet la fabrication de volumes en 2,5D. L'impression par concrétion est contrainte par le besoin d'un support, les trois dimensions d'un objet sont donc capables d'être produites, mais les limites de cette technique font qu'elle est définie comme de la 2,7D. Enfin une imprimante par fixation peut produire un ensemble de forme proche d'une 3D complète. Nous avons choisi d'expliquer ces différences par une modélisation dynamique (Figure 92).

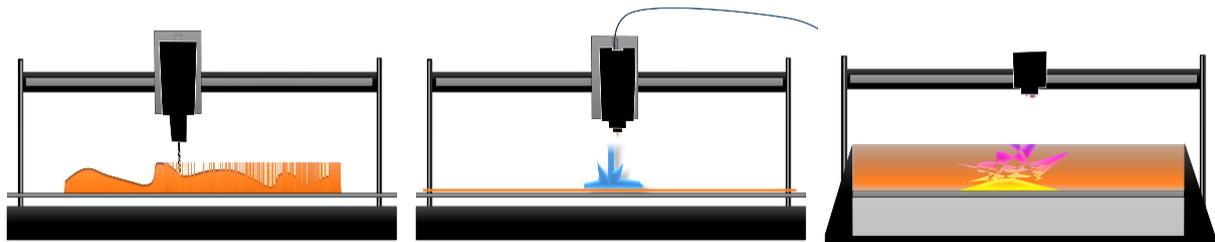


Figure 92 Modélisations des procédés de production de formes des machines à commandes numériques. Fraisage(G), Concrétion(M), Fixation(D) – Extrait vidéo.

Le format présent de diffusion de cette expérience ne nous ne permet pas de présenter cette modélisation dans son ensemble. Nous y voyons les cinématiques de production de trois objets sur un même plan. Cette représentation a permis de montrer le fonctionnement de trois machines dont les axes sont les mêmes, mais dont l'objet produit est différent. Ce fait n'était pas évident à comprendre pour le milieu professionnel visé, moins habitué à la robotique que d'autres milieux industriels. Les réactions devant cette animation lancèrent le débat principalement sur la prise en main de ces machines. « Comment je programme ces mouvements ? Est-ce que je peux reprogrammer durant la production ? » « Comment gérer les matériaux ; Leur disposition, leur préparation ? Est-ce que j'ai accès à l'objet durant sa production ? » « Si je conçois un objet en plusieurs parties, est-ce que je peux le produire en une seule fois ? ».

Le besoin de produire des objets en une seule tâche ressort souvent dans nos observations. Malgré tout, nous constatons que nos hypothèses sur les usages de production par assemblages pourraient se confirmer. Nous n'avons toutefois pas pu faire ressortir les pistes d'une réflexion en 2D pour produire en 3D. Un dernier échange sur ce point nous fait apparaître que ce mode de réflexion paraît trop indirect.

A l'issue de ces échanges, le choix se porte sur une machine à fabrication additive. Il reste toutefois un dernier critère à valider : celui du processus de fabrication. Nous allons explorer ce point via une recherche du process avec les équipes qui seront en charge de la conception des objets (définition et usage) et celles chargées de leur production (modélisation + impression)

Evaluation des ressources et process :

Nous avons vu précédemment plusieurs étapes d'accompagnement du choix dans la sélection de machines à commandes numériques pour une entreprise générale. La dernière étape pour laquelle nous sommes intervenus, concernait la mise en lumière d'un processus de production pertinent vis-à-vis des pratiques présentes dans l'entreprise. Nous avons travaillé par formulation d'hypothèses issues de la littérature scientifique et professionnelle sur les sujets de la conception et la fabrication des objets grâce au numérique. Nous avons ensuite observé les pratiques de conception en 3D existantes dans l'entreprises pour faire un travail d'analogie avec celles nécessaires à la production sur des machines à commandes numériques. Ces postulats ont été soumis aux futurs utilisateurs pour valider la démarche.

Au moment de cette étude, des solutions de modélisations étaient encore en phase de déploiement. Les pratiques de modélisation et d'exploitation des modèles étaient en phase d'exploration grâce à des outils BIM. Nous bénéficions alors de peu de recul sur ces pratiques, mais nous pouvions observer des usages à travers la mise en œuvre de différents cas d'études. Ceux-ci variaient selon les typologies d'affaires.

Nous observons plusieurs utilisations des modèles numériques avec une première distinction entre ceux exploités lors des études de prix et ceux exploités lors des travaux. Pour des raisons de délais de mise en œuvre de cette recherche, nous n'avons pas pu nous pencher complètement sur la partie travaux. Nous avons néanmoins pu observer que l'exploitation des modèles dans les phases d'études d'exécution, de synthèse ainsi que dans la coordination des corps d'états étaient envisagées. Il y aurait alors un aller-retour constant entre les services d'étude et les services de production de la maquette. La maquette a aussi pour ambition de rassembler les DOE : documentation de l'ensemble des ouvrages réalisés.

En Etude de prix nous avons observé l'exploitation de modèles numériques, principalement afin d'exposer des méthodes de mise en œuvre sur chantier et des variantes. Ces modèles étaient parfois produits de toute pièce, à partir des plans de la maîtrise d'œuvre, et étaient envisagés comme outil de contrôle (quantités, correspondances entre les plans etc...). Dans d'autres cas, ces modèles provenaient de la maîtrise d'œuvre comme support de plan lors des phases de consultation. Le travail sur la maquette se restreignait donc à l'analyse de la qualité du modèle, la modélisation de phases de production et la récolte de prises de vues à des fins d'illustration des dossiers. Cette utilisation restreinte provenait des conditions de consultation. En effet la maquette n'était alors pas considérée comme une pièce du dossier d'appel d'offre. Ni la maîtrise d'œuvre ni le constructeur ne souhaitaient l'intégrer par manque de maîtrise sur la qualité de l'objet. Malgré tout, des utilisations plus poussées étaient envisagées, si le cadre des consultations était amené à évoluer. Nous devons donc les intégrer à nos hypothèses sur les processus.

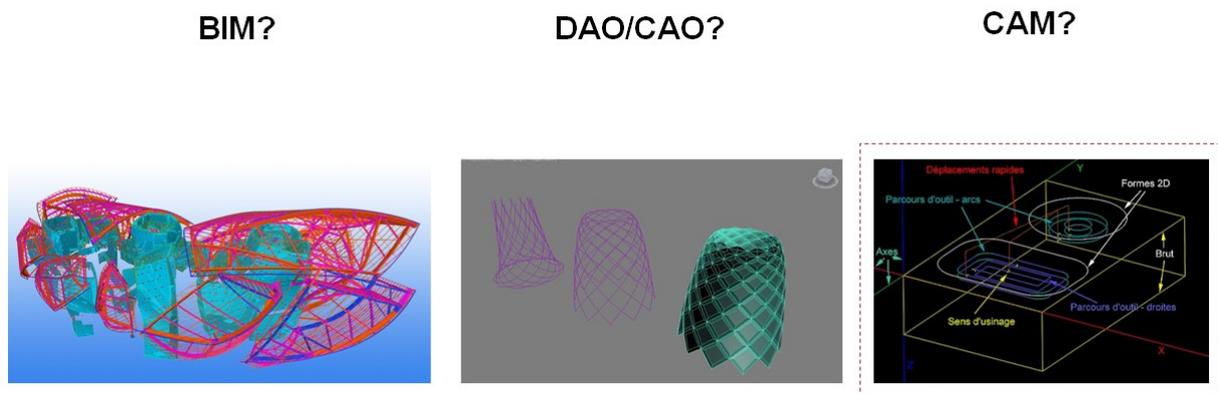


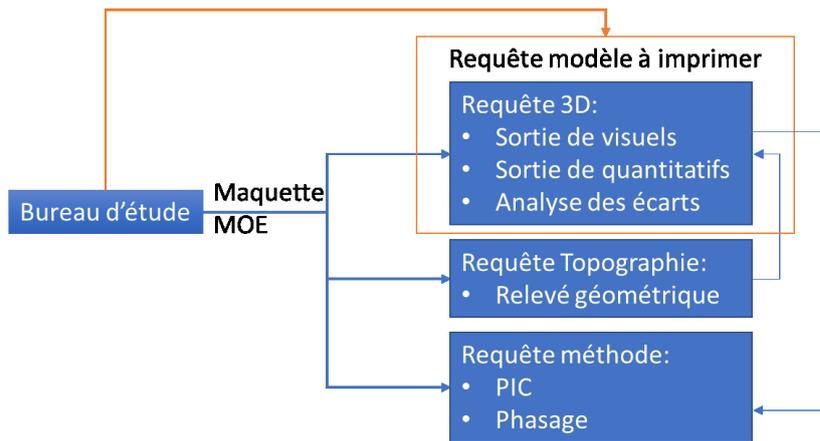
Figure 93 Interfaces nécessaires au passage du BIM vers l'impression 3D

De manière générale, les machines à commande numérique possèdent leur environnement logiciels spécifiques. C'est à partir de leurs propres interfaces que les parcours des outils sont programmés. Ces interfaces peuvent utiliser des modèles importés, en trois dimensions sous des formats spécifiques. Par exemple le format STL pour la fabrication additive.

Les modèles BIM peuvent produire des fichiers sous ce format, mais la manière dont les objets sont modélisés dans ces outils n'est pas prévue pour l'impression. Le passage du BIM aux interfaces machines nécessite trois opérations de traitement des modèles (Figure 93). D'abord la modification du modèles BIM en lui-même suivant les objectifs de représentation. Découpage des zones, suppression d'objets etc... Ensuite le transfert du modèle sur des logiciels de modélisation surfaciques (DAO). Les surfaces doivent y être assemblées pour former un volume fermé. Enfin le traitement de ces modèles se fait sur des logiciels de conception orientée machine (CAM).

Quelle que soit la machine à employer le processus est le même, toutefois les services à mobiliser ne seront pas les mêmes selon les modes d'exploitation de la maquette. Nous avons représenté les processus de travail autour de la maquette numérique en étude de prix pour identifier l'impact d'une requête de fabrication à partir d'une machine à commande numérique (Figure 94). Nous remarquons que dans le cas où la maquette est déjà disponible, le travail peut se concentrer sur le service en charge du modèle. Lorsque la maquette est à produire, les interactions entre les services nécessitent une coordination de l'information.

Cas maquette disponible



Cas maquette à créer

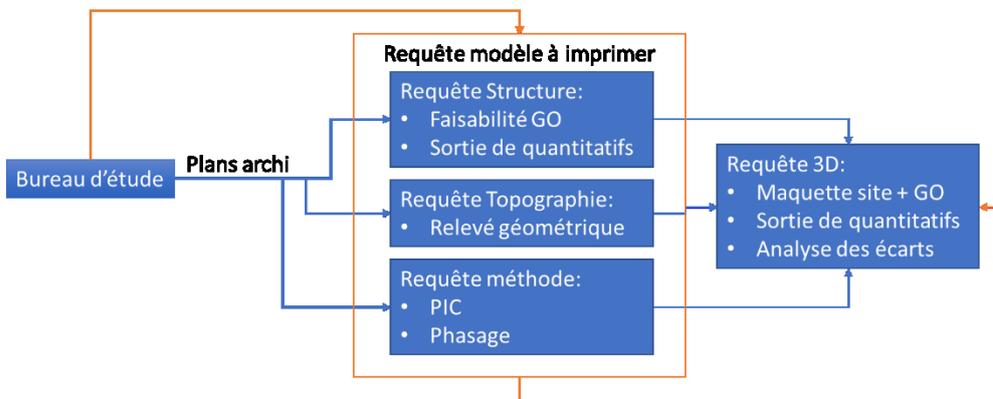


Figure 94 Représentations des processus de travail observés sur une maquette BIM en phase appel d'offre

Cette phase d'étude n'a donc pas permis d'aider dans le choix d'une machine puisque les processus dépendent essentiellement du fonctionnement de l'entreprise. Cette étape semblait superflue, mais elle a servi de support à la partie déploiement que nous expliquerons plus tard.

Conclusion

Le choix final s'est porté sur une machine à fabrication additive par fixation de poudre. Nous avons vu que ce choix n'a pas été facile. Nous avons pu observer de nombreuses manières d'appréhender les outils de fabrication assistés par ordinateur dans une entreprise de construction. Nous pourrions conclure que ce type d'observation est tout à fait normal et pourrait correspondre à des méthodes courantes d'évaluation d'outils de production par des ingénieurs. Néanmoins nous pensons pouvoir expliquer cet effort par des raisons plus globales, relatives au monde de la construction.

En effet, la production de maquettes physiques à échelle réduite n'est pas une activité courante dans les entreprises de construction. Nous avons pu aussi constater que la production de maquette numériques était problématique. Cela vient peut-être du fait qu'il s'agisse des balbutiements du BIM et que son fonctionnement contrevient aux process traditionnels de gestion des projets de construction. La maquette numérique et l'activité que nous souhaitons mettre en place remettent la conception au cœur de la gestion de la construction. Or, le découpage imposé entre maîtrise d'œuvre et constructeur freine les volontés de s'approprier ces outils par peur de sortir de rôles prédéfinis. Ce découpage implique notamment des responsabilités que les constructeurs ne souhaitent pas endosser.

La richesse de nos observations sur cette phase pourrait donc être biaisée. Nous avons néanmoins pu explorer le sujet de l'intégration d'un nouvel outil dans le fonctionnement d'une entreprise de construction. Ces résultats pourraient être exploitables dans le domaine de la gestion de l'innovation pour d'autres technologies.

2.2. Les cas d'applications observés

Nous avons pu observer un processus de sélection de machines à commandes numériques en vue d'une exploitation par une entreprise de construction en phases d'études. Ce processus a abouti à l'acquisition d'une machine à fabrication additive par fixation de poudre. Nous allons décrire et classer ici un échantillon des productions faites sur ce support. Pour rappel, l'usage d'un tel outil est nouveau dans le contexte que nous étudions. Cet usage est rapidement associé aux activités de modélisations numériques des bâtiments, qui elles-mêmes étaient en cours de développement au moment de cette étude. Nous avons donc pu observer un processus de détermination de l'usage, avec des essais qui ont tous aboutis sur une production, mais dont nous ne pouvons déterminer la reproductibilité.

Ces cas d'application sont principalement liés aux processus d'études de faisabilité. Ils sont réalisés à la demande des services d'études de prix et d'ingénierie technique. Ils correspondent globalement à des besoins de communiquer. Pour rappel, nous souhaitons observer des réflexions portant sur les modes constructifs, avec des analogies entre la machine de prototypage, et la machine de production sur chantier.

2.2.1 Expliquer et justifier un phasage de chantier

Nous allons voir ici le premier pas vers un usage de la fabrication additive en étude. Il s'agit de produire un extrait d'une maquette BIM sur ouvrage tertiaire neuf dont les fondations sont fixées sur une dalle métallique. La fabrication de cet ouvrage nécessite une optimisation de l'organisation des équipes de production car sa conception génère des chevauchements de tâches potentiels (Porte-à-faux, structure mixte, gestion des mitoyenneté, etc...). Nait alors la volonté de créer un modèle explicatif sur la base d'un modèle BIM. Celui-ci aurait vocation à être transmis à la maîtrise d'ouvrage, mais aussi aux équipes de chantier. Ce modèle permettrait de voir les descentes de charges, et la phase de pose des éléments de structure, de la dalle jusqu'au dernier étage.

Lors de la mise au point de la commande nous constatons une difficulté de penser les éléments à produire. L'exploitation du BIM a créé des habitudes sur la manipulation de modèles numériques permettant l'affichage de coupes et la mise en transparence de certains éléments. Le modèle physique demandé devrait laisser entrevoir un maximum de détails et donc se voir débarrassé d'éléments structurels tels que des planchers, des contreventements et une partie du noyau. Il n'est bien évidemment pas possible de produire un tel objet, nous entamons donc une réflexion sur l'usage.

Comment sera montré le modèle ? Que peut-il apporter de plus que son pendant numérique ? Nous résolvons une partie des attendus en termes d'informations en identifiant les éléments par des couleurs et en conservant planchers pour tenir l'ensemble. (Figure 95 et Figure 96).

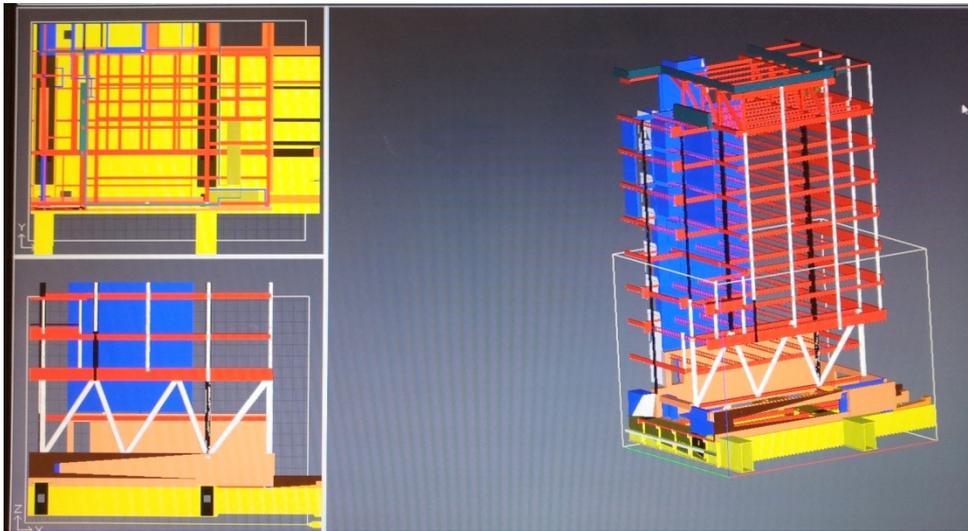


Figure 95 Modèle numérique préparé pour l'impression



Figure 96 Maquette partielle de structure mixte sur dalle – Echelle 1/100

Malgré ces ajustements le résultat ne semble pas satisfaire les besoins exprimés. La maquette permet une perception différente du modèle, mais sur un fragment du bâtiment. Cette vision partielle était déjà permise par le modèle numérique, avec des fonctionnalités étendues, telles que le changement d'échelle ou de couleurs. Nous verrons dans les cas suivants comment l'usage de la fabrication additive va se fixer.

2.2.2 Figurer un processus de conception – Envisager sa construction

Le cas d'un projet de luxe à l'architecture complexe nous est rapporté. Sur ce projet une partie de la conception reste incomplète. L'entreprise que nous observons se doit de proposer des solutions techniques répondant aux exigences architecturales avant de se voir attribuer le chantier. Le projet architectural fait apparaître un modèle d'atrium comportant un escalier monumental. L'ensemble de l'ouvrage suit une composition de dalles superposées en strates. L'escalier suit cette même règle mais aucun dessin de la structure le supportant n'est présent. La maîtrise d'œuvre souhaite que la structure reste invisible et compte sur l'entreprise de construction pour proposer des solutions.

Des propositions de support par des poutres métalliques sont modélisées. Mais les différents documents présentés laissent un doute concernant le respect des attentes de l'architecte. L'hypothèse est faite qu'un support physique de présentation pourrait changer le ressenti de l'architecte sur cet ouvrage. Deux maquettes sont ainsi créées : Une première d'un détail de fixation à la même échelle que l'ouvrage (Figure 97), et une deuxième de l'escalier (Figure 98).

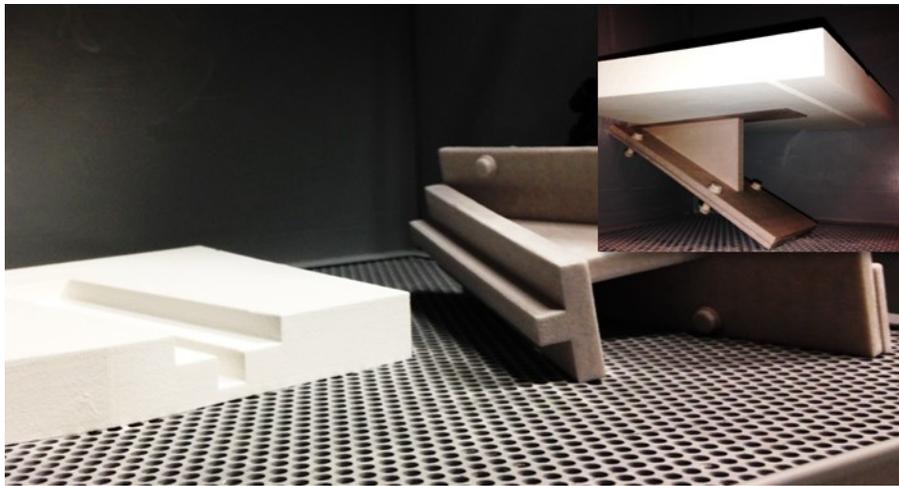


Figure 97 Maquette d'un détail de fixation - Echelle 1/1

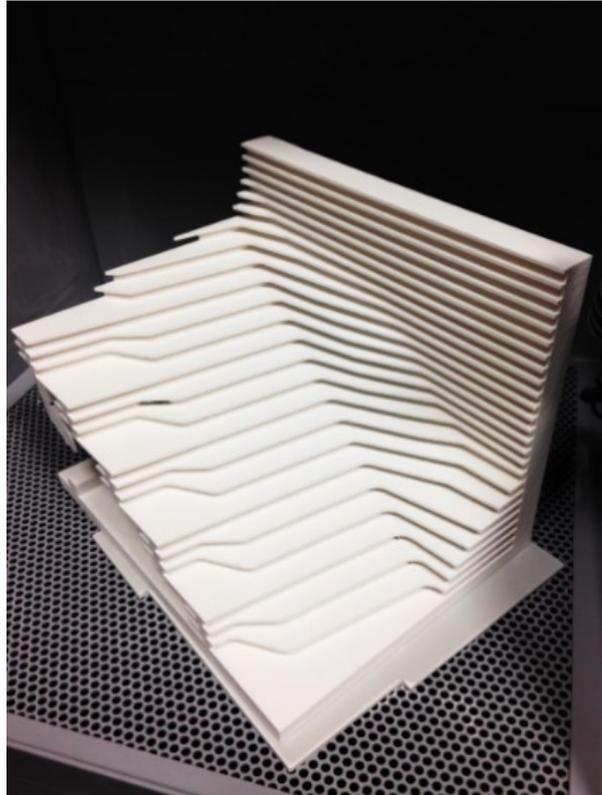


Figure 98 Maquette de l'escalier - Echelle 1/25

Les retours nous indiquent que la maquette a joué son rôle. Nous pouvons alors envisager que l'usage observé est pertinent dans l'activité de l'entreprise de construction. Lors du travail sur ce cas d'application, un autre usage fut exploré. Le passage de la mécatronique de conception vers la mécatronique de construction est évoqué. L'emploi de techniques de fabrication additive à l'échelle du bâtiment est envisagé. Malheureusement le flou concernant ces techniques et les délais de réalisations imposés n'ont pas permis de pousser cette réflexion jusqu'à son application. Toutefois une nomenclature spécifique est appliquée sur des éléments modélisés en prévision d'une éventuelle production sous cette forme. Cela n'aurait été exécuté que sur la production des strates, mais nous aurions pu pousser la réflexion jusqu'à la production des supports avec les mêmes techniques.

Nous entrevoyons dans cet exemple le début d'une réflexion correspondant à nos hypothèses sur le passage de la mécatronique de conception vers la mécatronique de construction. Cela constituera malheureusement la seule occurrence pour le cas d'étude sur les machines à commandes numériques.

2.2.3 Proposer des variantes de conception - Comparer et évaluer

Un nouveau cas de réalisation nous est soumis. Il s'agit d'une variante sur un mode constructif où les libertés prises d'un point de vue technique ont une incidence sur la forme de l'ouvrage (Figure 99). Suivant l'exemple du chantier de l'escalier, une maquette est censée être produite pour servir de support au dialogue avec la maîtrise d'œuvre. La variante et le modèle conçu seront tous deux produits à la même échelle pour servir de support de médiation.

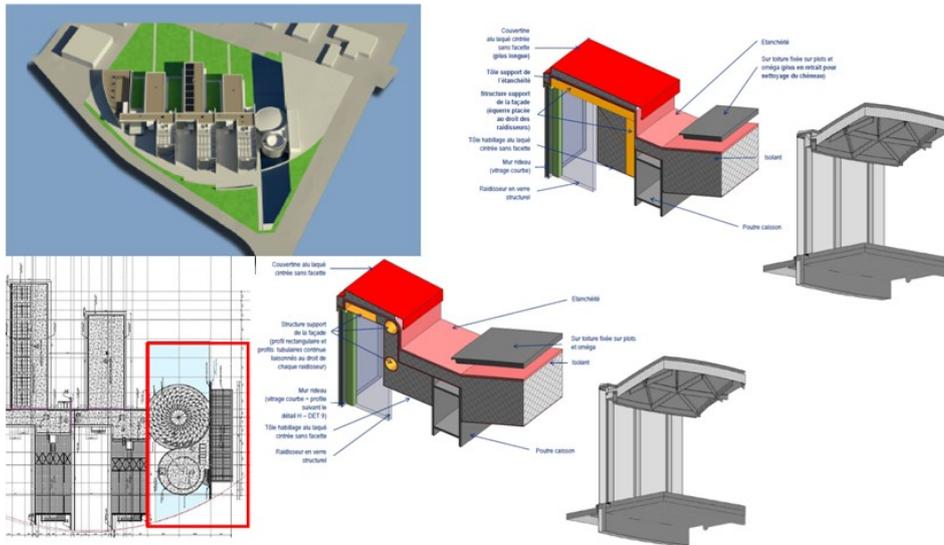


Figure 99 Documents de présentation de la variante

Nous choisissons de produire la maquette à l'identique des modèles des documents de présentation. Cette démarche a pour but de révéler aussi les différences de perception entre ces deux modèles. Un modèle numérique est créé pour servir d'interface avec la machine (Figure 100). Sur ce modèle des ajustements sont faits pour que les éléments soient attachés. Encore une fois nous rencontrons des demandes de mise en transparence sur certains éléments, sans pouvoir y répondre. Deux maquettes sont produites sur cette base, et présentées à la maîtrise d'œuvre (Figure 101).

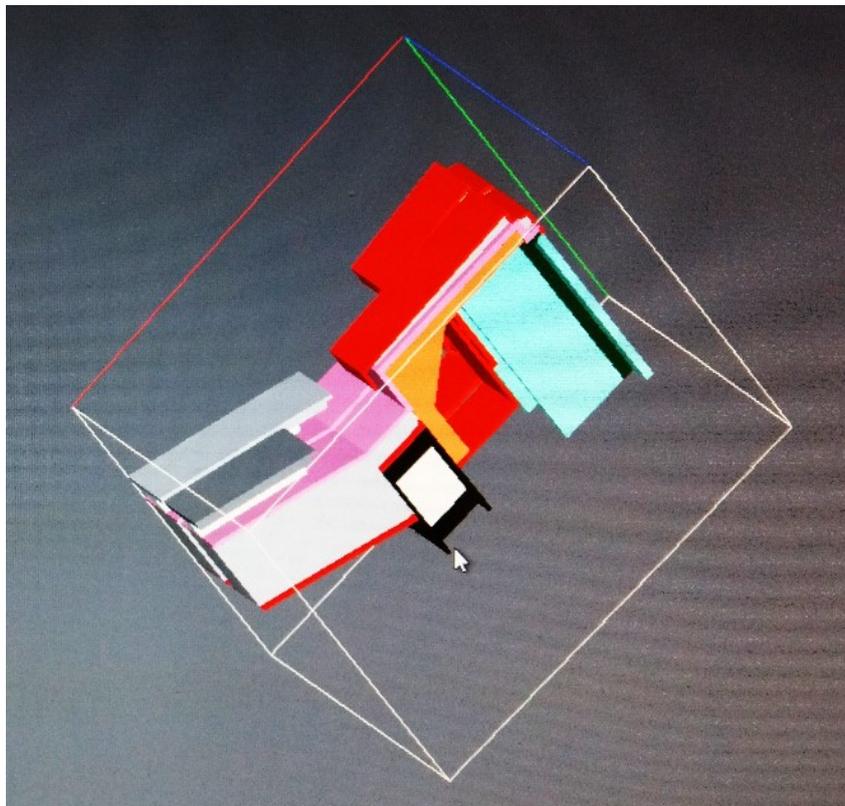


Figure 100 Modèles pour impression



Figure 101 Maquette détail de couverture - Echelle 1/20

2.2.4 Faciliter la simulation – Se libérer du numérique.

Nous devons évaluer la faisabilité d'une mise en œuvre de menuiseries extérieures par l'intérieur sur un bâtiment de bureau afin d'éviter le coût d'une installation de chantier dédiée à cette tâche. La configuration de pose de ces éléments est contrainte par le fait qu'elles doivent filer sur deux niveaux. Cette mise en œuvre complexe doit être simulée. La modélisation de la cinématique peut être réalisée grâce à des outils de simulation numériques. Mais cette simulation ne peut pas être faite par une personne non experte de ce type de logiciels. Or dans ce cas la simulation doit être réalisée par des experts dans la réalisation de façade. Il est donc décidé d'avoir recours à la production de modèles physiques pour tester les étapes de mise en œuvre et déterminer la meilleure solution. Une portion de la façade et des planchers sont produits en fabrication additive, ainsi que différents gabarits de menuiserie (Figure 102). Puis des tests sont réalisés suivant différentes conditions (Figure 103, Figure 104). La maquette physique semble bien être le medium le plus adapté et valide un cas d'application supplémentaire à notre panel observé.



Figure 102 Modèles de test

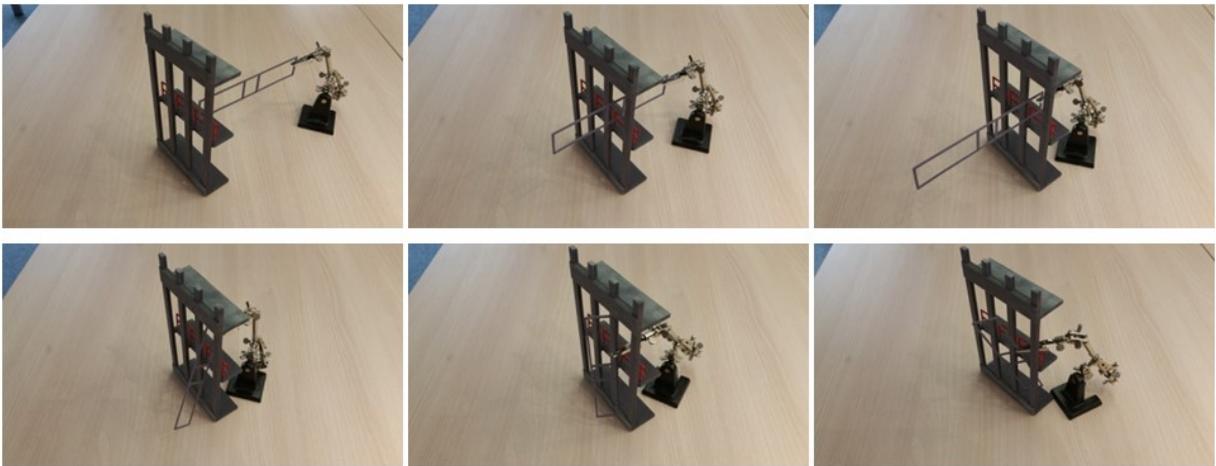


Figure 103 Cinématique de pose par le niveau haut

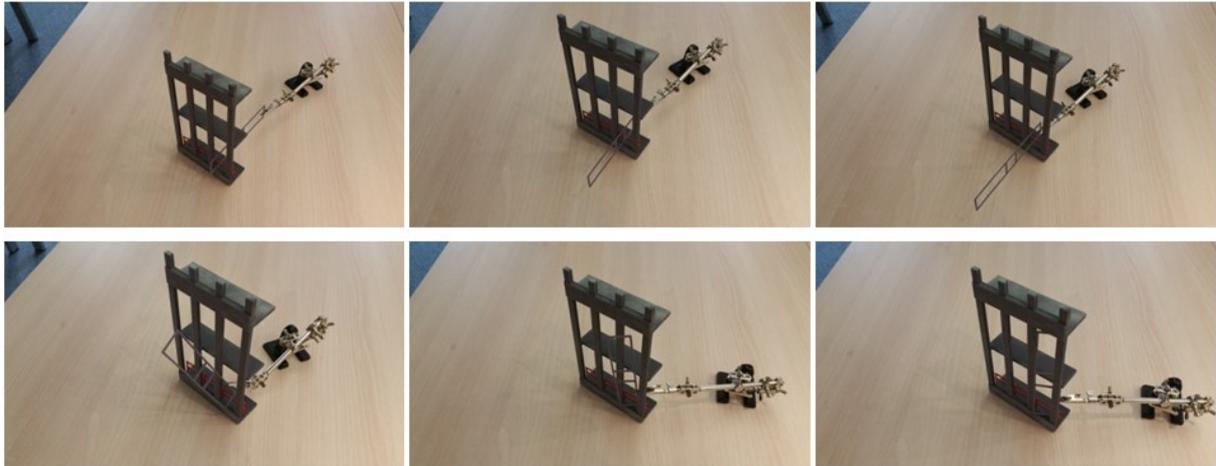


Figure 104 Cinématique de pose par le niveau bas

3. Microcontrôleurs et prototypage de robots de construction

Notre premier cas d'étude sur la mécatronique de conception nous donne de nombreuses réponses, notamment sur les stratégies d'intégration d'un outil mécatronique en entreprise générale, ainsi que le rapport à son utilisation. Nous avons pu observer des blocages, certainement dus à des contraintes correspondant au partage des responsabilités sur la conception entre maîtrise d'œuvre et constructeur. Ces blocages sont sûrement causés, aussi, par le fonctionnement des entreprises générales de construction, dont la vocation est bien de construire, mais en faisant appel à d'autres intervenants dont le savoir-faire propre interviendra dans la réalisation. Nos observations sur le rapport aux machines à commandes numériques s'éloignent donc des pratiques plus créatives que nous avons pu observer dans le monde de l'architecture et du design.

Il nous semble néanmoins que nous n'avons qu'effleuré certaines questions telles que l'intégration de ces outils vers la production sur chantier. De plus nous nous sommes contentés d'un outil mécatronique déjà constitué, sans moyen d'intervenir sur ce qui le compose. La première étude permettait d'approcher la question du choix et de l'exploitation d'outils mécatroniques, mais pas leur conception.

Nous entamons donc une nouvelle part de cette recherche avec d'autres méthodes d'exploration. Nous prenons l'initiative d'introduire des cas pratiques de conception de systèmes mécatroniques à l'aide de support matériels tels que des microcontrôleurs. Nous sommes passés par des dispositifs expérimentaux proches de l'enseignement afin de révéler le regard que peuvent porter divers acteurs de la construction.

Ce cas d'étude a pris deux formes consécutives : une première phase d'apprentissage permettant de constituer des règles de conception pour la définition de concepts de systèmes mécatroniques de chantier. Puis une deuxième phase de transmission permettant de vérifier l'appropriation de ces règles de conception par des acteurs de la construction.

3.1. Phases d'explorations : des bases de la mécatronique aux systèmes plus complexes

N'étant pas experts de la mécatronique, nous avons dû apprendre quelques bases sur la pratique du projet en robotique. Nous souhaitons décrire le processus d'apprentissage qui mène à la capacité de concevoir des outils mécatroniques simples avec les moyens disponibles pour le prototypage rapide. Nous avons dirigé cet apprentissage vers des concepts faisant écho à des problématiques de chantier. Nous expliquerons les bases de ces réflexions, allant du système le plus simple à des systèmes plus complexes s'approchant de ceux présents dans l'industrie. Montage de machines à commandes numériques, maquettes de robots mobiles et anthropomorphes, prototypage de systèmes minimalistes. Cette dernière étape nous a permis entre autre de déterminer deux concepts d'outils mécatroniques applicables aux chantiers.

Ces différentes activités ont ouvert la voie à de nombreuses réflexions. Les systèmes de commande, les interfaces homme-machine, les comportements des outils sur chantier, l'intelligence artificielle etc. Nous ferons état de ces réflexions pour comprendre le fonctionnement de ces attributions de concepts.

3.1.1 Montage de machines à commandes numériques

Nous faisons l'acquisition de deux kits de montage de machines à commande numérique (Figure 105). La première est un robot cartésien conçu pour des usages multiples de type impression 3D, fraisage, découpe laser. La deuxième machine est un robot delta conçu exclusivement pour l'impression 3D.

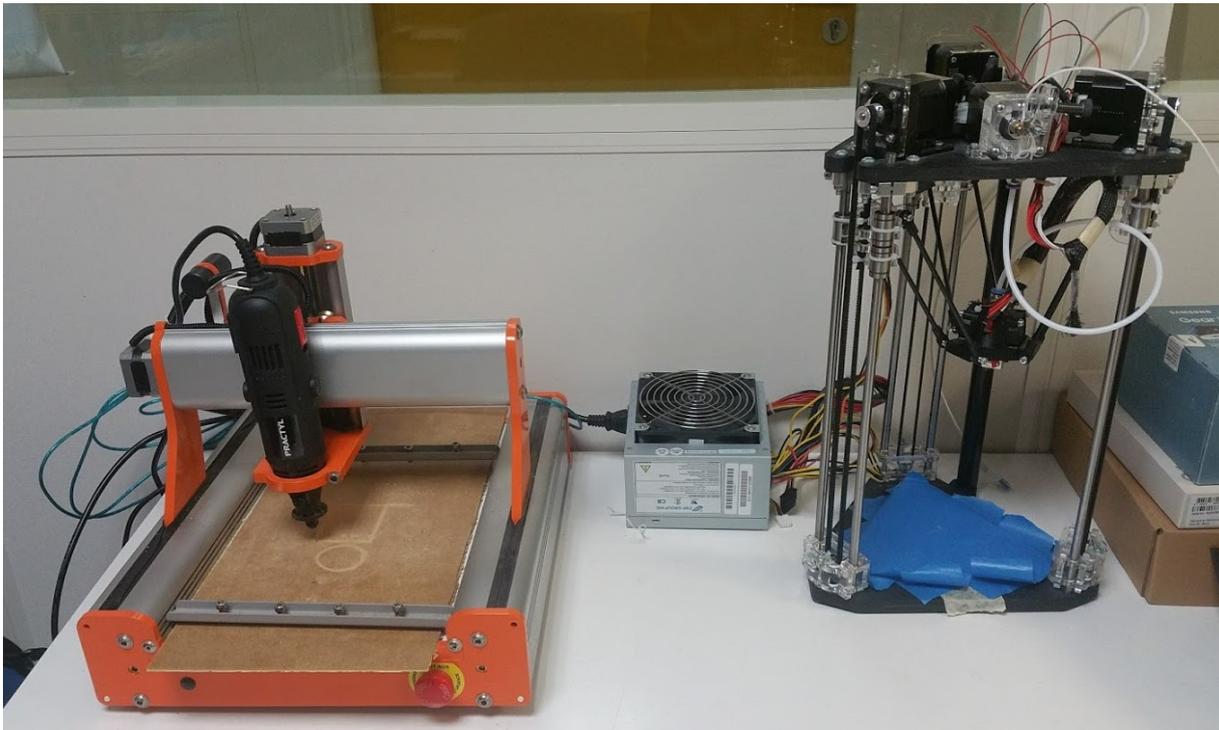


Figure 105 Montages de machines à commandes numériques /Fraiseuse numérique (G) et imprimante 3D (D)

Le montage de ce type de machine n'est pas excessivement compliqué. Il s'agit d'assemblages simples, en suivant un enchainement d'axes caractérisés par des éléments mécaniques et électromécaniques.

Ces éléments sont en grand partie les mêmes quelle que soit la destination de la machine. La partie électronique est aussi un assemblage constitué de branchements de capteurs et de moteurs sur une carte électronique. La dernière étape est la programmation puis l'exploitation de ces outils.

L'exploitation de ces outils nous mène à d'autres constats. Le besoin de gérer de manière fine certaines productions nous ont poussés à modifier des éléments mécaniques, ajouter des capteurs et modifier le code inscrit sur la carte électronique.

Cette étape de la recherche nous a permis d'appréhender un peu mieux la notion de mécatronique. Les caractéristiques fondamentales d'une machine à commande numérique, et les éléments de base que l'on retrouve dans ce type de machines. Les moteurs, les capteurs, la partie électronique et numérique, les éléments de gestion de l'énergie, les dispositifs de communication, et les interfaces de commande.

3.1.2 Montage et programmation d'un robot anthropomorphe

Montage initial

Inspirés par le travail d'architectes autour du thème des robots anthropomorphes, nous décidons d'explorer la conception d'un tel système. Nous faisons l'acquisition d'éléments permettant de réaliser une maquette de robot 6 axes, sur lequel nous installons un microcontrôleur (Figure 106). Chaque articulation est composée de deux axes ; un axe centré et un axé déporté. Nous réalisons quelques programmes permettant de contrôler chaque moteur, et prenons assez vite conscience de la nécessité de produire une interface de commande.

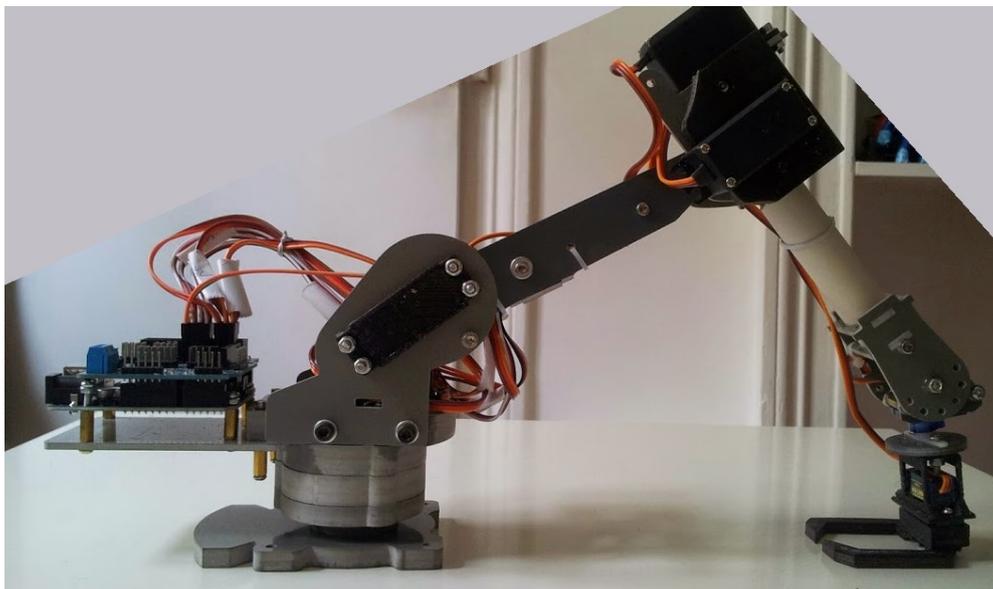


Figure 106 Montage initial d'un robot anthropomorphe 6 axes

Définition d'un système de commande

Une fois le système réalisé nous posons la question des systèmes de commande. Nous essayons par ailleurs de contextualiser cette question vis-à-vis de nos objectifs de développement. A quoi devrait ressembler l'interface de commande d'un robot anthropomorphe sur chantier ? Qui va prendre la

main sur le robot, et de quelle manière, dans quel but ? Nous explorons les solutions existantes dans l'univers de la robotique industrielle. Nous ne prétendons pas avoir fait un inventaire exhaustif.

L'exploitation de robots anthropomorphes sur une chaîne de production ne laisse pas le droit à l'erreur pour des raisons de mise en sécurité du personnel et garantir les cadences. Des moyens de prévisions et de calcul des mouvements sont employés pour leur contrôle. Ceci passe par des interfaces logicielles de modélisation et de cinématique. Ces logiciels sont complétés d'algorithmes de cinématique inverse. Ces derniers permettent de calculer les mouvements de l'ensemble des articulations d'un robot en fonction de la position de l'outil à déplacer. Ces procédés de programmation sont longs et impliquent de la main d'œuvre spécialisée. Cet investissement se rentabilise sur des tâches répétitives nombreuses et impliquant une grande précision.

Pour éviter ce type de procédés des contrôles et programmation par commandes directes existent. Chaque axe est déplacé manuellement ou par l'intermédiaire de commandes analogiques. Il est alors possible de réaliser les mouvements nécessaires à l'accomplissement d'une tâche, d'enregistrer chaque ensemble de position, puis de reproduire la cinématique en boucle. Il nous semble que ce type de dispositifs est plus adapté aux chantiers, par sa rapidité d'exécution le rendant plus adaptable.

Nous installons donc 3 joysticks pour le contrôle des 6 axes et deux boutons d'interface pour le contrôle de l'outil ainsi que l'enregistrement et le lancement des séquences programmées (Figure 107). Afin de tester l'appropriation réelle de ce type de dispositifs par le personnel de chantier, nous souhaitons organiser des phases d'expérimentations sous forme d'atelier. Cette étape n'a pas été réalisée au cours de cette recherche et pourrait faire l'objet d'autres travaux.



Figure 107 Système final avec son interface de commande

3.1.3 Montage et programmation d'un robot mobile

Nous nous intéressons ici à la robotique mobile pour initier le même type de réflexion sur des modèles réduits. Nous avons ici un modèle simple doté de roues sans fin et de deux roues à la fois motrices directionnelles. Un accéléromètre, un capteur de distance et des capteurs photosensibles sont installés afin de contrôler les déplacements et permettre différents types de programmation (Figure 108).

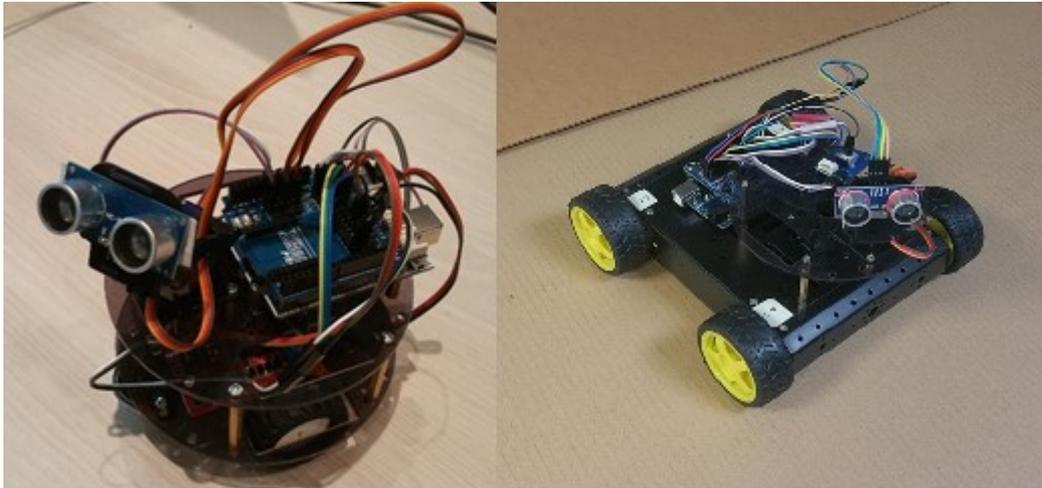


Figure 108 Systèmes mobiles de mécatronique de conception testés

Des tests de programmation sont réalisés suivant différentes approches du déplacement. Ils pour but d'appréhender les applications sur chantier et sont employés dans des démonstrations auprès d'acteurs de la construction (Figure 109).

Suivi de ligne : Trois capteurs de couleur sont disposés perpendiculairement à une ligne tracée au sol. La machine avance, et s'oriente en fonction du capteur repérant la couleur de la ligne.

Mouvements aléatoires : Il s'agit d'un petit algorithme qui permet la navigation d'un robot dans une pièce. Des capteurs à ultrasons permettent de repérer les obstacles, et le microcontrôleur opère un choix d'orientation du robot suivant la plus grande aire de dégagement.

Mouvements aléatoires contrôlés : Nous avons pour objectif d'imposer un tracé pour traiter l'ensemble d'une surface. La programmation d'un mouvement aléatoire nous sert de base, pour sa capacité à éviter les obstacles. Pour ce faire, nous devons connaître la position du robot dans l'espace. Nous ajoutons donc un capteur de type centrale inertielle.

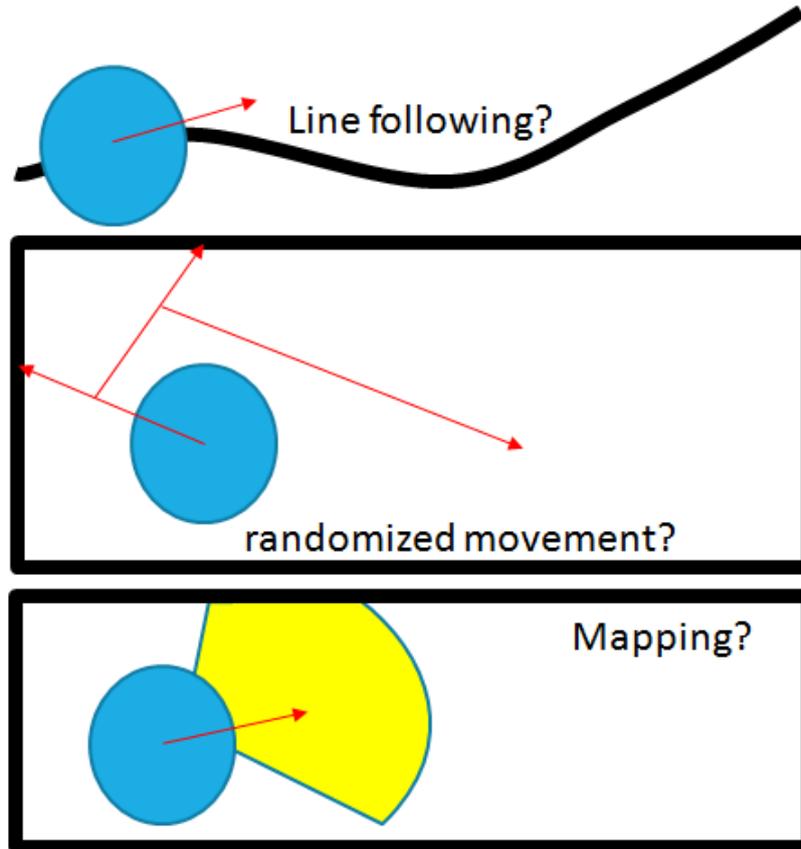


Figure 109 Schématisation des différents comportements testés.

Des exemples déjà connus du monde de la robotique de construction sont spontanément évoqués. Traitement de surfaces, logistique, tracés, relevés. Si à priori ces systèmes existent à grande échelle, et emploient bien les modes de programmation évoqués, il apparaît que leur déploiement semble inenvisageable car trop simple. De plus la connaissance réelle des déplacements de la main d'œuvre sur chantier est mal maîtrisée par le personnel présent en bureau d'étude ainsi qu'en conduite de travaux.

Nous concluons qu'une activité de conception de la construction intégrant ce type de système n'est pas envisageable lors des études en entreprise générale. Un travail avec des équipes de production serait sûrement plus pertinent. Nous n'avons pas eu le temps de mettre en œuvre des expérimentations dédiées à ce thème. La question reste donc posée pour de futures recherches.

3.1.4 Conception de systèmes de coffrage automatisés

A l'issue de cette phase d'apprentissage des systèmes de base du prototypage rapide nous décidons des systèmes basiques et d'intégrer directement la question de l'application en construction. Nous recentrons la conception sur un principes de base d'association de capteurs, de boucles algorithmiques et de contrôle des moteurs. Nous nous intéressons alors au gros œuvre et plus précisément aux techniques de coffrage. Ce travail nous conduit à la réalisation de prototypes de systèmes qui nous servirons plus tard d'exemple de méthode de conception (Figure 110).

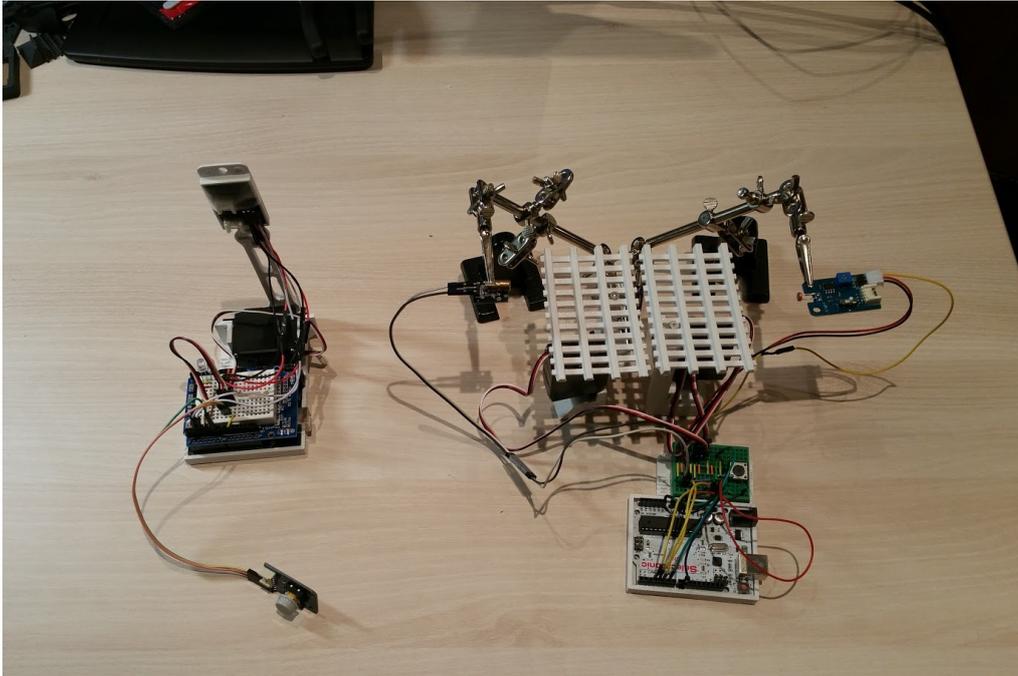


Figure 110 Photo des deux prototypes de systèmes mécatroniques pour la construction

Automatisation des coffrages de banche

Le coffrage par banche est sûrement la technique la plus répandue en construction neuve. Elle consiste à placer en regard deux éléments mécaniques appelés banches. Elles servent de moule pour la réalisation de murs en béton armé. Malgré l'aspect assez simple de cette technique, ses dimensions font que les opérations d'installation deviennent complexes. Elles impliquent la mobilisation de grues et d'une main d'œuvre spécialisée pour l'implantation et l'ajustement des outils mécaniques lors de leur mise en place. Parmi ces tâches d'ajustement, nous choisissons celle de mise à l'aplomb.

La mise à l'aplomb nécessite la coordination de deux équipes. Chacune s'attribue une banche et règle la mise à l'aplomb en plusieurs points en agissant sur des étais (Figure 111). Cette tâche nous semble automatisable en remplaçant le fil à plomb par un capteur d'orientation, en motorisant les étais et en contrôlant le tout par ordinateur.

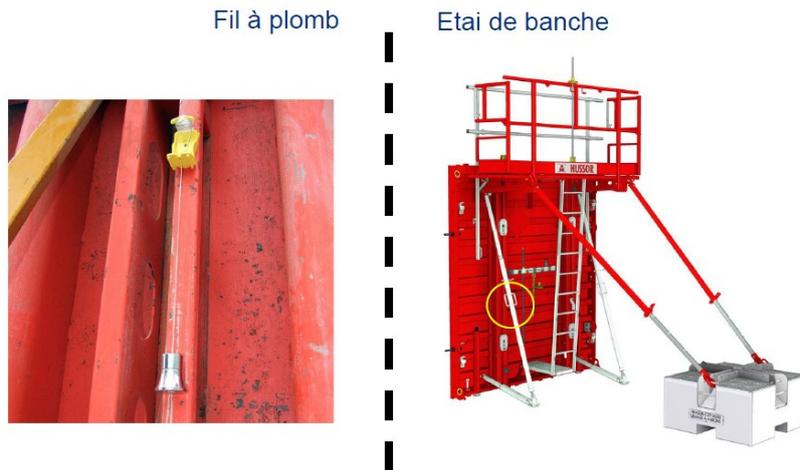


Figure 111 Hypothèse de réduction du problème de mise à l'aplomb

Nous avons composé ce système mécatronique à partir des éléments suivants : Un moteur simulant le mouvement imposé par l'étau sur la banche ; Deux capteurs d'inclinaisons traitant chacun de l'inclinaison de 0 à 90 degrés et de 90 à 180 degrés. (Leur signal est binaire, ils ne donnent donc comme information que le dépassement de l'angle de 90 degrés à plus ou moins 2 degrés près) ; Une interface homme machine disposant d'un bouton pour déclencher la séquence de mise à l'aplomb, et de LEDs informant de l'orientation (Figure 112).

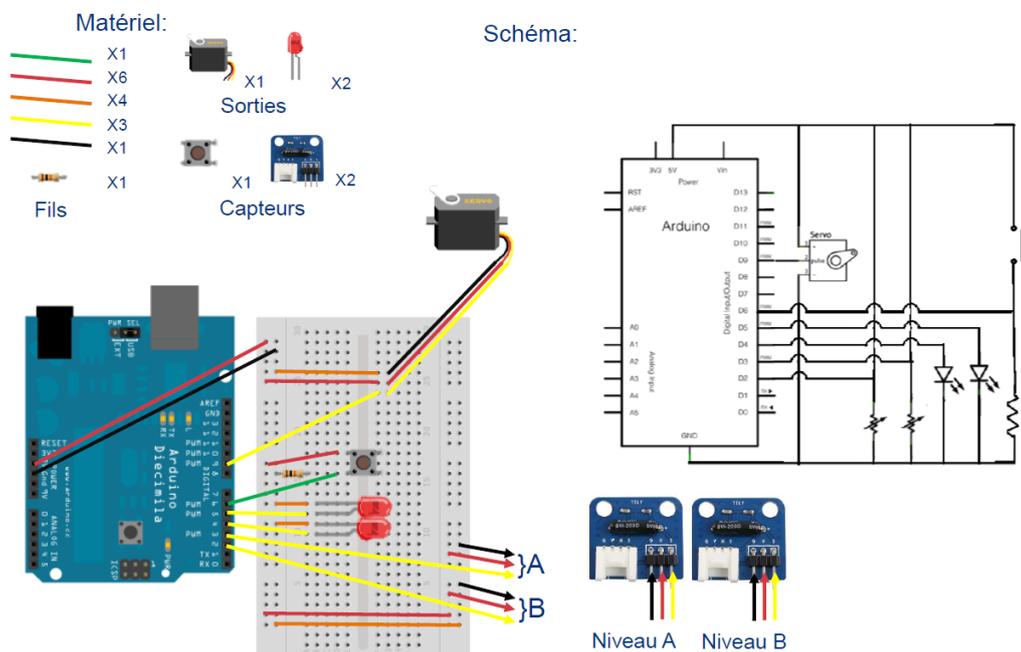


Figure 112 Schémas du montage électronique sur le microcontrôleur

Le programme que nous avons inscrit dans le microcontrôleur est une boucle en lecture permanente (Figure 113). Elle traite les valeurs transmises par les capteurs et boutons, puis agit sur la position des composants mécaniques ainsi que sur l'allumage des LEDs.

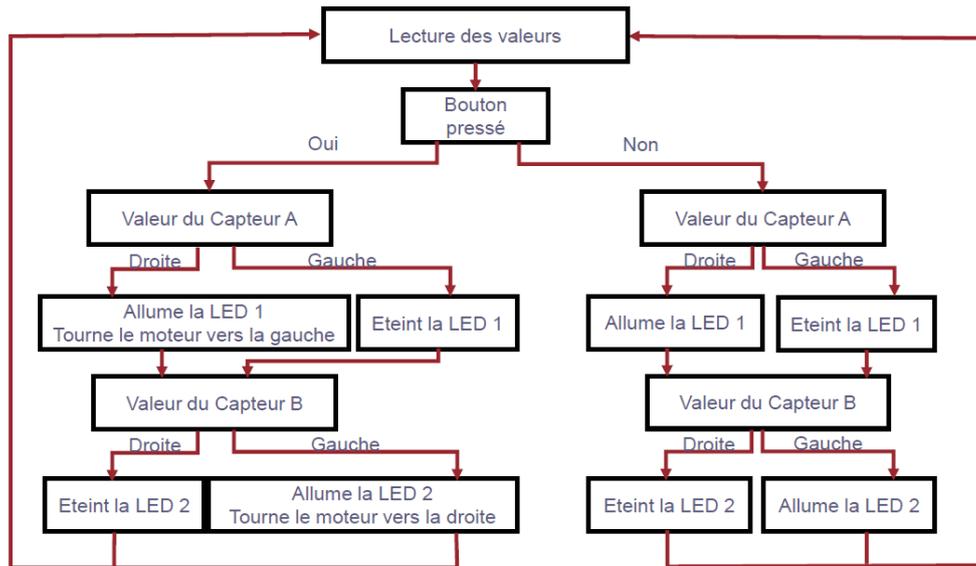


Figure 113 Algorithme simplifié du programme de mis à l'aplomb

Automatisation des coffrages de plancher

Le deuxième projet concerne les coffrages de planchers. Ils sont réalisés la plupart du temps grâce à un complexe de poutrelles et panneaux de coffrage, reprenant la forme voulue en partie basse de l'élément à couler (Figure 114). Ces outils sont mis en place et réglés avec des étais et contrôlés par un système de mesure du niveau (exemple lasers). Nous prenons cette mesure et cet outil mécanique comme base de conception de ce deuxième prototype.



Figure 114 Hypothèse de réduction du problème de niveau de coffrage de plancher

Ce deuxième système est composé d'un moteur simulant le mouvement imposé par l'étau sur le coffrage de plancher, d'un laser créant une limite simulant le niveau attendu, associé à un capteur de type photoélectrique permettant de repérer le signal du laser, et d'une interface homme machine similaire au premier prototype, disposant d'un bouton pour déclencher la séquence de mise à niveau, et de LEDs informant de la détection du signal laser ou non (Figure 115).

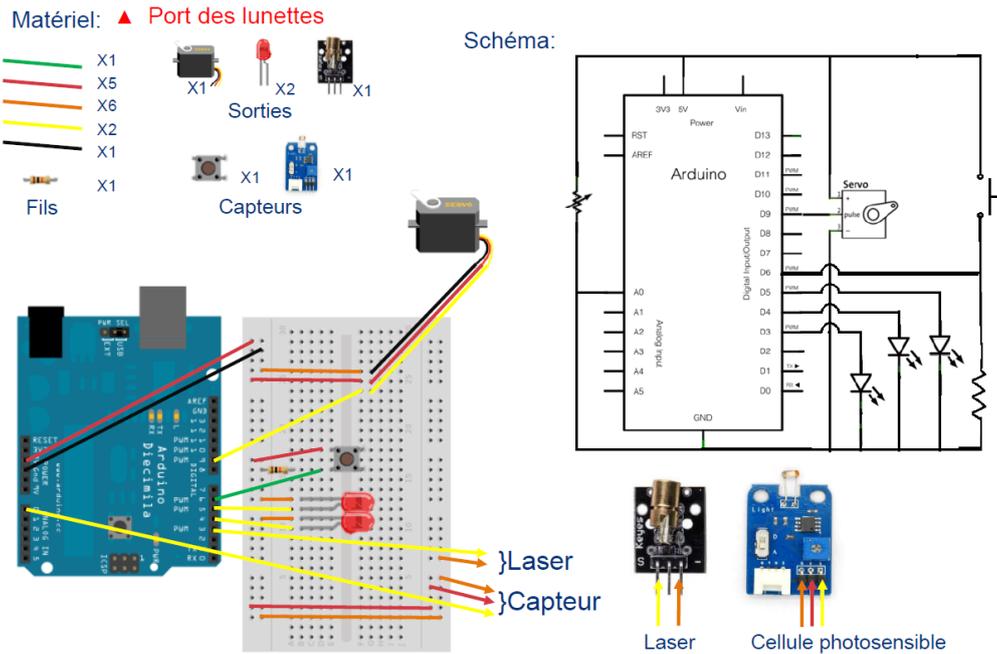


Figure 115 Schémas du montage électronique sur le microcontrôleur

Le programme que nous avons inscrit dans le microcontrôleur est aussi une boucle en lecture permanente (Figure 116). Elle traite les valeurs transmises par les capteurs et boutons, puis agit sur la position des composants mécaniques ainsi que sur l'allumage des LEDS.

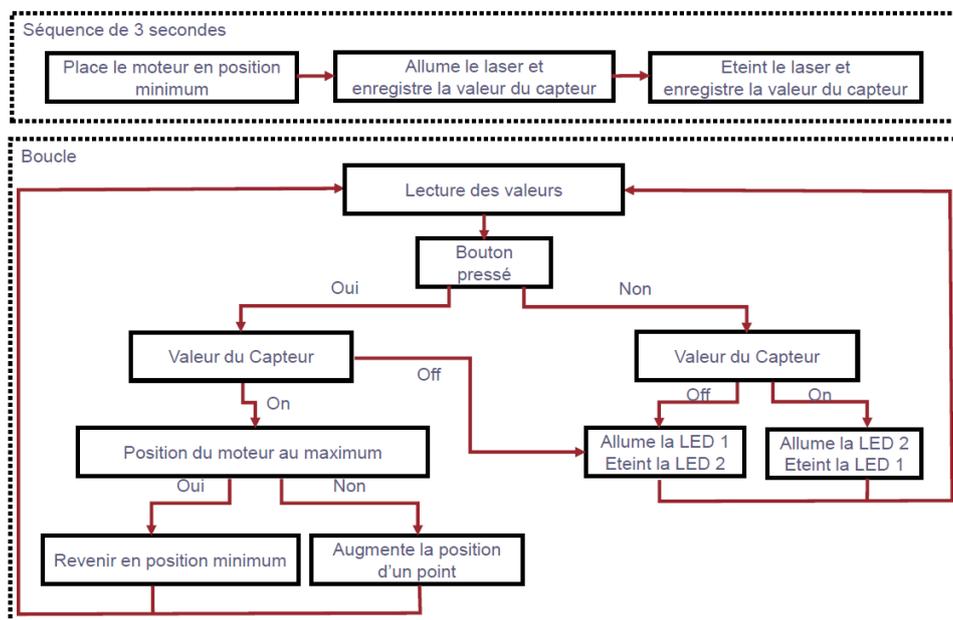


Figure 116 Algorithme simplifié du programme de mise à niveau

3.2. Mécatronique de conception et acteurs de la construction

Nous savons maintenant qu'il est possible de générer des concepts de systèmes mécatroniques pour chantier par une pratique de conception centrée sur les outils de prototypage rapide et ouverte sur les concepts de production sur chantier.

Pour représenter ces concepts nous avons eu besoin de représenter l'idée générale par des schémas de principes, l'assemblage par des schémas d'électroniques, le programme par des algorithmes. Les schémas de principes permettent de faire apparaître la correspondance entre les éléments du système constructif et les éléments du système mécatronique. Les schémas d'électronique et les algorithmes permettent de faire apparaître la cohérence du montage et de ses actions.

Pour valider la pertinence de cette première étude nous devons savoir si les acteurs de la construction sont à même de s'approprier ces pratiques. Nous avons donc mis en place un complément à nos expérimentations par l'organisation d'ateliers dont le but fut d'enseigner les savoirs construits précédemment et de valider leur transmissibilité sur un panel d'ingénieurs des bureaux d'études et d'équipe de conduite de travaux.

3.2.1 La construction de l'atelier/expérimentation :

L'enseignement porte sur deux cas pratiques et vise à reproduire le cheminement de la réflexion sur la production de concepts et ouvre sur une phase d'exploration. Les principes de base d'un projet sur microcontrôleur sont présentés (Capteurs, moteurs, entrées et sorties, programmation).

Deux exercices types sont alors soumis aux participants. Ils doivent reproduire l'assemblage des composants des deux systèmes présentés plus tôt (Banche automatisée et coffrage de plancher). Lors de cette phase les schémas de principes, schémas de montages, algorithmes et scripts leur sont présentés.

A l'issue de ces exercices, deux questions leurs sont soumises. La première leur demande de représenter le fonctionnement du système qu'ils viennent d'observer. La deuxième leur demande de trouver des leviers d'optimisation. Le mode d'expression est libre (schémas, dessins, texte, maquette).

Enfin, il leur est demandé de construire un projet de système similaire, sur la base des éléments appris lors des deux exercices.

Nous avons sélectionné un panel de 28 personnes, réparties en groupes de 4 à 6 participants sur 5 sessions. Nous avons choisi des profils représentatifs, proportionnels à l'effectif, des acteurs présents sur notre terrain : Ingénieurs études de prix (15), conducteurs de travaux (6), ingénieurs Clos-couvert (2), ingénieur corps d'états techniques (1), ingénieur structure (1), ingénieur 3D (1), directeur travaux (1), prévention (1)

L'observation de leur production, nous permettra d'analyser leur capacité à s'approprier les pratiques qui leur sont présentés sur trois critères :

- Expliquer le fonctionnement d'un système
- Optimiser ce système
- Se lancer dans une production de concept

Nous analyserons ces observations de manière statistique, mais aussi qualitative. Nous prêterons attention aux modes d'expression pour savoir ce qu'ils peuvent nous dire sur les manières d'aborder le sujet.

3.2.2 Tendances générales de représentation et de projets

Expliquer le fonctionnement d'un système

L'explication du fonctionnement des systèmes reproduits ne semble pas poser de problèmes. 75% des participants ont pu répondre à l'exercice. Ils l'ont fait naturellement, autant par dessins (10%), que du texte (29%) ou des algorithmes (61%). Nous pouvons voir que les représentations par algorithmes sont majoritaires. Elles ne reprennent pas les codes de représentation présents en informatique et sont parfois imparfaites, mais se rapprochent de la réalité du fonctionnement réel par boucles sur une suite d'instructions (Figure 117).

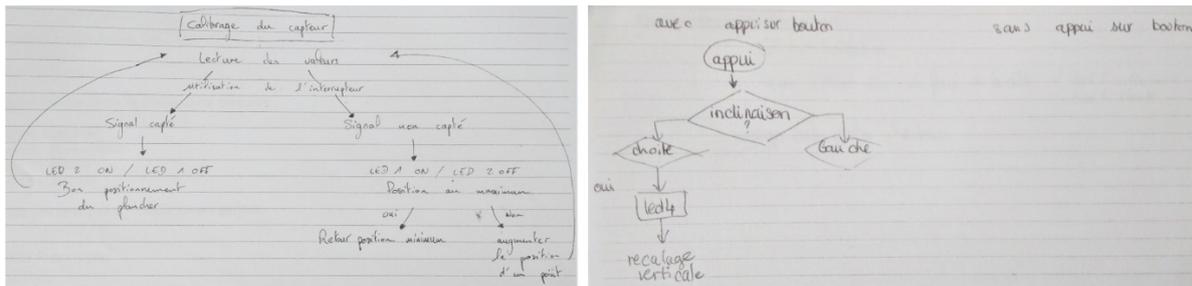


Figure 117 Exemples de représentations d'un système mécatronique par des acteurs de la construction sous forme d'algorithmes.

Nous pourrions conclure que la représentation par algorithmes serait un moyen privilégié à adopter dans le cadre de ce type de projets. Toutefois nous devons prendre des précautions car le nombre de représentations sous forme texte et de dessins n'est pas anodin. Ceux-ci permettent sûrement de faire apparaître autant les observations sur l'objet que sur son fonctionnement. Par ailleurs nous pouvons constater que certains d'entre eux se rapprochent de la description d'un algorithme, avec des séquences et des instructions. Les dessins peuvent faire apparaître des éléments physiques, mais aussi des modélisations des cinématiques (Figure 118).

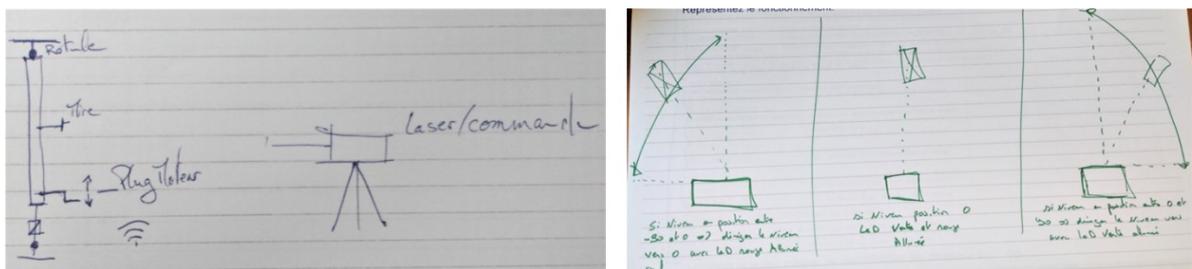


Figure 118 Exemples de représentations d'un système mécatronique par des acteurs de la construction (dessin).

Les exemples de texte, embrayent majoritairement sur le point de vue de l'opérateur de la machine pour enchaîner sur les opérations de la machine. Par exemple :

"Lorsque j'appuie sur le bouton :

1) lecture de position

2) Si angle $> 15^\circ$ gauche ou angle $> 15^\circ$ droite. Déplacer de 5° en 5° avec lecture à

chaque interruption

2) Si angle <15° droite ou angle < 15° gauche. Déplacer de 1° en 1° avec lecture à chaque interruption

3) Si angle <1° à droite ou angle <1° à gauche -> arrêter moteur"

D'autres réduisent le système à ses composants et leur mise en correspondance :

"Contrôle led / Contrôle moteur

Fonctionnement suivant : Conditions/Capteur

But : se mette d'Aplomb"

"-Le programme détecte s'il a une inclinaison du système (qui est visuellement représentée avec des diodes)

-Si « A » penche d'un côté, il corrige en incrémentant la position du moteur"

Ces résultats confirment nos hypothèses et viennent les affiner en nous donnant une première tendance générale sur les moyens d'appropriation. Il nous reste à vérifier si ces modes de représentations permettent aussi d'agir sur la conception, et s'il s'agit des bons supports pour la génération de concepts.

Proposer des optimisations

Les phases de propositions d'optimisations semblent plus délicates. Le nombre de participants ayant répondu à l'exercice tombe à 62%. Ici la représentation par algorithmes disparaît au profit de textes (83%) ou de dessins (17%).

Si l'on regarde de plus près ces propositions, elles portent sur l'amélioration de la sécurité du personnel et de la qualité de la production.

"-Ralentissement du système une fois proche des 90°

-Automatisation (éviter les manips sur des boutons)

-Capteur pour un aplomb horizontal"

"Se fait à distance pour éviter contact entre homme/robot. Bouton d'arrêt en fonction des angles"

"Afficher le degré d'erreurs (ex -3°) + Un signal sonore"

"Ajouter des capteurs pour vérifier :

-le bon étalement

-Si la banche n'est pas voilée/ D'aplombs par rapport aux axes

-Bien implantée par rapport aux axes d'implantation"

D'autres permettent d'ouvrir sur des réflexions. Faire état des enjeux sans forcément apporter de réponses :

" Comment assurer la sécurité si la banche tombe ? S'il pleut, avec le vent ou en cas de mauvais appui"

"Vérifier si l'épaisseur demandée est bien respectée -> avec un capteur"

Les dessins sont moins nombreux, mais nous renseignent tout de même sur des aspects différents de la prise en considération des optimisations. Ils présentent parfois une vision plus détaillée du système avec la disposition des éléments. Ou à l'inverse, une prise de distance par la représentation de systèmes plus vagues (Figure 119).

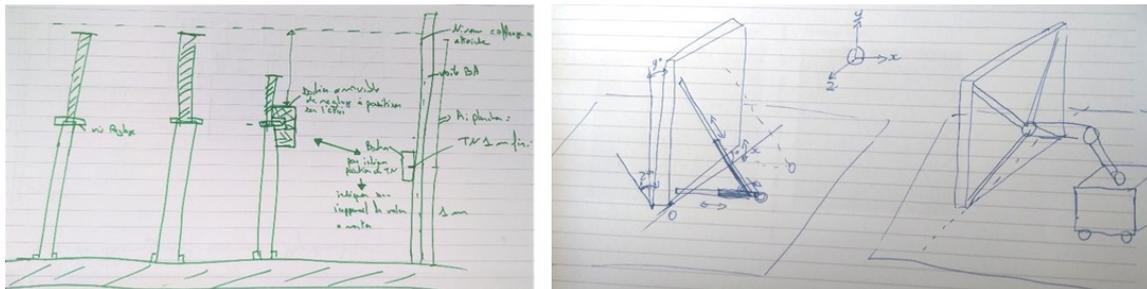


Figure 119 Exemples de représentations pour l'optimisation d'un système mécatronique par des acteurs de la construction

Nous aurions pu penser que les propositions d'optimisations seraient figurées directement sur les algorithmes ayant servi à représenter le fonctionnement. Nous voyons ici que ce mode de projet n'est pas naturel. La continuité du projet ne dépend donc pas d'une continuité dans la représentation. L'algorithme est perçu comme un moment de fixation du projet, tandis que l'expression par textes et dessins ouvre le champ de la réflexion.

Construire un projet

Le nombre de participants ayant réussi l'exercice passe à 68% soit 19 candidats sur les 28 du panel. Les trois quarts se sont naturellement orientés vers des représentations par dessin et texte et 42% ont couplé les deux méthodes pour décrire le fonctionnement de leur projet. L'utilisation d'algorithmes ne représente que 21% des cas observés et ne sont jamais employés seuls.

Aucun des participants ne s'est exprimé par l'utilisation de maquettes. Le temps de l'expérimentation ne le permettait sûrement pas (40 minutes). Nous avons laissé l'opportunité aux participants de se lancer dans des étapes de prototypage sur leurs concepts ultérieurement, mais encore une fois, aucun n'a prolongé l'expérience au-delà.

Description du fonctionnement	Nombre	Taux
Texte et dessin	8	42%
Texte uniquement	5	26%
Dessin et algorithme	3	16%
Dessin uniquement	2	11%
Texte et algorithme	1	5%
Maquette	0	0%
Algorithme uniquement	0	0%
Total	19	100%

Si nous nous intéressons à l'utilisation effective du triptyque (capteurs, moteurs, programme), proposé comme base de définition des concepts, nous observons des difficultés d'appropriation. Seuls 21% des participants ont réussi à décrire un modèle complet, 11% n'ont pas du tout réussi et 68% ne l'ont fait que partiellement. Après entretien avec les participants sur ces difficultés, il apparaît que leurs métiers ne font pas appel à un ensemble complet des tâches de construction.

Référence au triptyque (capteurs, moteurs, programme)	Nombre	Taux
Partiel	13	68%
Oui	4	21%
Non	2	11%
Total	19	100%

Si l'on se penche plus spécifiquement sur les références partielles, nous pouvons observer que les participants s'appuient majoritairement sur les éléments de mesure. L'organisation de chantier et le respect du modèle à construire ressortent dans ces exemples et marquent leur priorité sur les méthodes de fabrication.

Détail des références partielles	Nombre	Taux
Capteur	5	38%
Capteur + Programme	5	38%
Moteur	2	15%
Capteur + Moteur	1	8%
Total	13	100%

Cette intuition se précise lorsque l'on observe la nature des projets. Seul 27% de ces projets se basent sur des concepts de fabrication (coulage et pose d'éléments). Le reste se base soit sur des tâches d'enlèvement de matière (32% de reprises et démolition) et sur de l'organisation de chantier (42% de logistique et sécurité).

Nature des projets	Nombre	Taux
Logistique	5	26%
Démolition	4	21%
Coulage	3	16%
Sécurité	3	16%
Pose d'éléments	2	11%
Reprise	2	11%
Total	19	100%

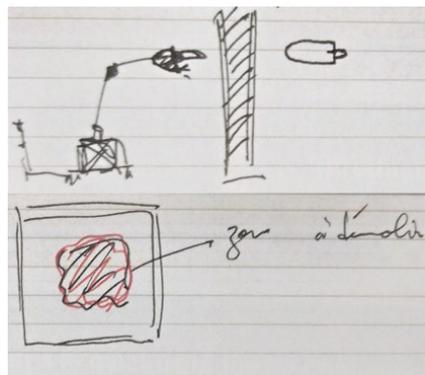
Toutefois le rapport entre la nature des projets et l'utilisation du triptyque ne se vérifie pas si nous les comparons statistiquement. Les opérations de fabrication pures semblent rendre l'utilisation du triptyque plus naturelle. Quelques applications en sécurité et démolition aussi, lorsqu'elles sont poussées jusqu'à une réflexion sur de la mise en œuvre.

Les opérations de fabrication ne mettant en jeu que de la pose semblent être développées de manière partielle, mais nous pensons que cela provient encore une fois d'une réflexion incomplète sur la mise en œuvre. Nos cas d'étude de coffrage présentés ne faisaient intervenir que la mise en place d'éléments ont servi de base à la définition du triptyque. Par ailleurs nos observations peuvent-être remises en cause car le jeu de données exploitables devient trop faible.

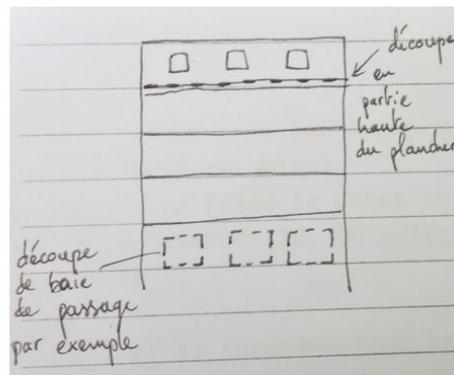
Nature des projets	Utilisation du triptyque		Total général
	Oui	Partiel ou absente	
Coulage	2	1	3
Sécurité	1	2	3
Pose d'éléments		2	2
Reprise		2	2
Démolition	1	3	4
Logistique		5	5
Total	4	15	19

Si l'on regarde de plus près les projets, nous pouvons vérifier ces intuitions. Les réflexions faisant intervenir une cinématique de mise en œuvre complète font nécessairement appel à l'ensemble des

éléments du triptyque. On peut voir Figure 120 le développement de deux concepts proches mais dont l'aboutissement n'est pas le même. Celui de gauche fait référence à une machine et un élément à mesurer, mais ne définit par le programme de fonctionnement. Dans la définition des tâches constructives en études ces détails ne sont pas pris en compte, car laissés à la charge d'un opérateur. Cette méconnaissance de la mise en œuvre rend la définition de concepts incomplète. Dans le concept de droite, la mise en œuvre est décrite et sert de guide à la description du système. On voit alors apparaître, tant dans le dessin que dans le texte, l'ensemble des références au type de capteurs et mesures impliquées, au moteur et les mouvements qu'il doit gérer, ainsi qu'au programme qui gère ces paramètres.



« Automatisation d'un BRH »



En démolition ou pour des ouvertures de baies, on pourrait créer une machine type disqueuse capable de suivre une trajectoire imposée, matérialisée par du scotch.

- Utilisation possible en réhabilitation pour des découpes par niveau, par trémie.

- La machine suit un laser positionné au préalable ou une ligne matérielle

- Des capteurs sont intégrés pour une découpe de niveau, pour régler l'inclinaison, les dimensions, la profondeur, l'angle,...

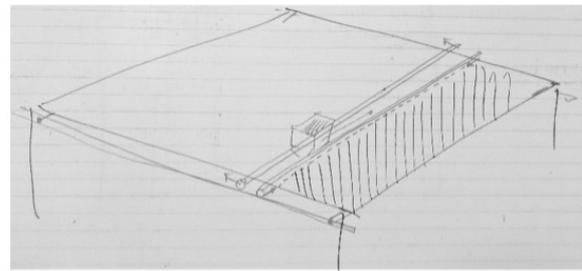
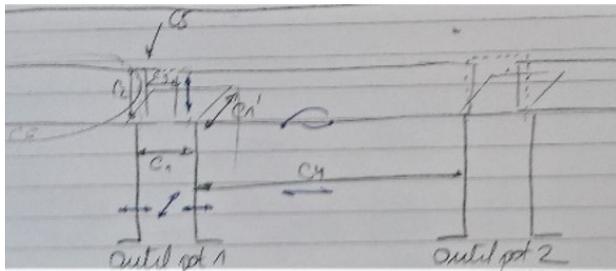
Type de mouvement majoritairement linéaires;

Type de mesure laser ou marquage manuel; Type de contrôle par envoi de données

Il faut penser à un moyen d'évacuation sur des parties découpées.

Figure 120 Exemple de concepts pour des systèmes automatisés de démolition/reprises. Création de passages de gaines dans une poutre (g). Création de passage de gaines dans un plancher (d).

Ces observations se retrouvent dans les concepts associés à des systèmes constructifs (Figure 121). Le système de droite décrit un concept de système pour le coulage de béton afin de constituer une dalle. Ici les capteurs sont internes au système mécanique, ce qui facilite leur choix. La cinématique complète de va et vient d'une buse pour la distribution de béton sur une surface pousse le concepteur à décrire le concept via l'ensemble des éléments de mécatronique. Le concept de gauche décrit une tâche de pose d'éléments préfabriqués. Ici les composantes mécaniques ne sont pas spécifiées. Elles sont pourtant nécessaires à la réalisation complète de la tâche car dans la réalité la pose fait intervenir une grue. Mais la pratique de la conception de la construction en bureau d'étude pousse à une réduction de la mise en œuvre où la grue devient un implicite. Un concept complet de système mécatronique aurait fait intervenir cet élément sous la forme d'une grue ou d'un élément mécanique ayant les mêmes fonctions.



Gérer la pose des poutres en façade et coulage des poteaux/outil trumeau en façade:

- C1: vérifier le bon écartement du coffrage = épaisseur du poteau
- C2: valider hauteur de coffrage suivant hauteur poutre préfa à venir
- C3: espacement suffisant entre poutres préfa
- C4: Bon espacement entre outils de coffrage des poteaux 1 et 2
- C5: Capteur hydro / arrêt de bétonnage
- C6: Capteur inclinomètre poutre
- Coulage "
- C1': vérifier le bon écartement du coffrage = longueur du poteau

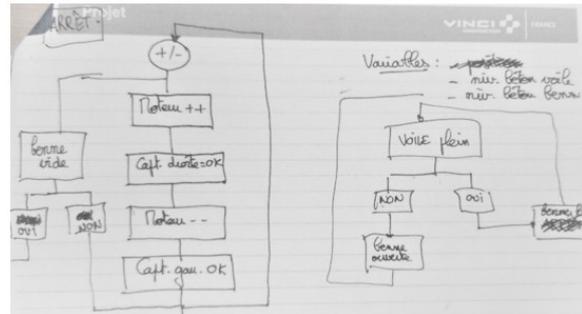


Figure 121 Exemples de concepts pour des systèmes constructifs automatisés. Pose et scellement d'une poutre en façade (g). Coulage d'une dalle par distribution de béton(d).

Le passage au prototypage n'apparait pas aisé. La production de concept passe plutôt par des descriptions d'un fonctionnement global par du texte et du dessin. La vérification de ces concepts devra être transmise via ces médiums. Le projet de prototypage de systèmes de mécatronique de construction ne semble pas mettre en jeu la pertinence du triptyque. C'est plutôt le découpage des tâches sur une opération complète de mise en œuvre qui va tronquer le raisonnement vers un système mécatronique. Il convient donc de faire intervenir tous les implicites dans la description du projet. La grue, les opérations de manutention ou manipulations, la réglementation, les mesures intermédiaires, sont autant d'éléments qu'il faudra faire réémerger dans la spécification du concept.

4. Synthèse

Dans ce chapitre nous avons pu traiter de la question de l'intégration des outils de mécatronique de conception dans une pratique de conception des chantiers en entreprise générale de construction. Nous souhaitons valider l'existence d'une génération de concepts pour la robotique de construction par l'utilisation des outils de prototypage rapide.

Diverses activités associant des acteurs de la construction ont été mises en place. Services d'ingénierie technique, services d'études de prix et services d'encadrement de chantier ont été mobilisés à chaque étape pour explorer l'intégration des machines à commandes numériques et des microcontrôleurs dans leur travail de conception des chantiers.

Nous avons pu observer les modes de sélection des outils les plus pertinents pour leur usage et l'arrivée progressive de réflexions sur la robotique de construction. Nous avons aussi pu observer les freins à l'intégration de ces outils. L'inadéquation de leurs métiers avec des logiques d'innovation. L'impossibilité de traiter de sujets de fabrication car non prioritaires dans ces phases de conception.

Le développement de ces pratiques favoriserait-il des réflexions sur la robotique de construction ? Nous avons pu voir que oui, car ces activités ont provoqué des réflexions sur les modes de production. Celles-ci sont rendues implicites dans l'étude des bâtiments. Elles deviennent des détails et n'émergent que lorsqu'elles deviennent des « sujets » à traiter. L'introduction des supports de prototypage rapide a poussé les acteurs étudiés à mobiliser ces connaissances constructives qu'ils laissent parfois de côté.

Ce mode de développement est-il pertinent dans une activité d'entreprise générale ? Probablement pas. L'apparition d'activités de modélisation a favorisé l'introduction des activités de prototypage rapide que nous proposons. Or, nous avons constaté que ces étapes de prototypage sont satellitaires. Les usages se portent sur la représentation ou la simulation de produit et non de modes de production.

Nous avons, toutefois, observé des réflexions plus riches sur les activités impliquant la conception de systèmes via les microcontrôleurs. Si leur introduction dans le travail des ingénieurs d'étude n'est pas envisageable, l'association de leur expertise apparaît bien génératrice de concepts pour la robotique de construction. Il faudra alors faire un travail de traduction car la définition des systèmes constructifs n'est pas toujours complète.

Chapitre 2. Projets de robotique de construction : Convergence entre concepts mécatroniques et problématiques de chantiers.

1. Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons étudié la génération de concepts pour la robotique de construction dans un cadre instrumenté. Au début de cette recherche nous ne souhaitons pas aller plus loin, mais l'opportunité s'est présentée d'observer des phénomènes de génération de concepts par d'autres méthodes. D'abord grâce au montage de projets en partenariat avec une entreprise de robotique et ensuite grâce à la remontée spontanée de problématiques de la part des équipes de conception et de gestion des chantiers. Nous avons différencié ces modes de projet, car leur gestion et les phénomènes observés ne sont pas les mêmes. Nous souhaitons connaître les spécificités de ces modes de génération de concepts et trouver les points de convergence leur donnant leur pertinence au sein d'un raisonnement de conception.

Ces expérimentations ont fait intervenir divers acteurs sous la forme de groupes de travail. Ce qui diverge fondamentalement de nos premières expérimentations est que le cadre technique imposé par les outils de prototypage rapide est remplacé par une expertise en robotique extérieure prenant le relais sur les concepts générés par notre terrain d'étude. Cette expertise vient d'un partenariat avec une entreprise d'intégration en robotique spécialisée dans l'automatisation d'usines et la conception de systèmes embarqués dans l'aéronautique ou l'automobile. Nous avons aussi bénéficié de leur connaissance des mécanismes de montage et gestion de projets de R&D

Le mode de production des concepts diverge aussi car il s'insère dans des cadres de conception plus théoriques et mettent les phases de prototypage au second plan ou totalement de côté. Cette libération des acteurs de la construction du poids de la réalisation aura sûrement des conséquences sur les formes que prendront les concepts. Nous pourrons l'observer à travers ces deux situations de conception que nous avons fait ressortir dans notre analyse.

2. L'approche technologique comme moyen de conception

2.1. Des impacts sur les raisonnements de conception

2.1.1 Projets de R&D et approche descendante

Nous souhaitons observer la production de concepts pour la mécatronique de construction par l'adaptation de concepts de mécatronique avancée. L'origine de cette approche est avant tout

économique car elle permet un accès aux programmes de financement de la recherche pour l'industrie ainsi qu'à des partenariats industriels. Mais ces raisons ne sont pas les seules, car nous avons pu constater un réel manque d'adéquation entre les outils de robotique de construction existants et les besoins exprimés par les acteurs de l'entreprise générale pour concevoir un chantier automatisé ou robotisé. Il nous a paru important d'explorer les concepts mécatroniques les plus récents pour y trouver une génération de concepts adaptée. Cette approche est aussi présente dans le monde de la recherche en robotique de construction. On y retrouve des réflexions sur des thèmes qui lui sont propres tels que la robotique mobile, les télé opérations ou les bâtiments connectés (Arai, 2011).

La méthode de conception que nous allons évaluer ici s'apparente à une approche descendante (ou Top-Down). Nous n'allons toutefois pas rentrer dans la théorie de ces méthodes de conception qui selon le contexte révèlent des contradictions et soulèvent des polémiques qui sortent des questionnements scientifiques qui nous préoccupent. Prenons pour exemple la critique qui fut faite sur les projets de navette spatiales américaines où les approches Top-Down furent soupçonnées d'être à l'origine de l'accident de Challenger en 1986 (Feynman, 1986). Il s'agit là d'une approche bien plus construite et systématique que celle que nous choisissons d'explorer. Nous ne nous intéressons ici qu'à la génération de concepts et pas à la gestion complète d'un projet industriel. Nous pouvons aussi définir cette approche par son opposition à l'approche ascendante qui part plutôt d'un ou plusieurs problèmes pour converger vers une solution technologique. Nous verrons le cas de ces approches ascendantes dans le cas d'étude suivant.

La découverte de solutions d'intégration de la mécatronique sur chantier peut donc passer par des activités de recherche en robotique. Si les connaissances en mécatronique sont assez vastes pour répondre à un grand nombre de configurations, il reste encore des parts à explorer et notamment dans le champ de la construction. Nous avons cherché à savoir comment monter des projets de ce type. Comment articuler les besoins d'une entreprise de construction avec ceux de la recherche. Nous avons donc choisi de conduire cette recherche par une exploration à travers le montage de projets de robotique de construction. Aucun d'eux n'a abouti sur des phases de prototypages. Néanmoins le cheminement de la pensée, de la compréhension des enjeux de la recherche en robotique à leur traduction sous forme de projets, nous renseigne sur un aspect majeur de la détermination de solutions mécatroniques pour le chantier.

2.1.2 Déterminer des objectifs : Les indicateurs et influences majeures

Les projets de R&D impliquent souvent de connaître leur maturité technologique pour fixer des marges de progressions avec des objectifs mesurables. L'évaluation de cette maturité se caractérise par une échelle appelée TRL déterminée par la direction de ces projets de R&D. Cette échelle comporte 9 niveaux allant de la formulation des concepts théoriques à leur intégration. La gestion du projet de R&D est centrée sur les niveaux de maturité intermédiaires avec un travail devant mener à des phases de prototypages incluant des tests de validation en laboratoire et en environnement réel. Cela donne un cadre au projet, mais introduit de la subjectivité car le niveau de maturité dépend du jugement des chargés de projet. Cette subjectivité relative est contrebalancée par l'introduction de réflexions scientifiques faisant intervenir un état de l'art et donc des connaissances partagées par des acteurs extérieurs au projet. D'autres éléments peuvent intervenir tels que l'utilisation d'outils d'analyse de bureaux d'études en stratégies de l'innovation. Par exemple les Hype Cycle représentant sur un graphique les technologies en cours de développement dans le monde industriel. La courbe n'est qu'une représentation, des variations d'intérêt supposées (investissements, ressources humaines déployées, études de marché). Chaque technologie à un niveau de maturité indépendant de son niveau d'intérêt.

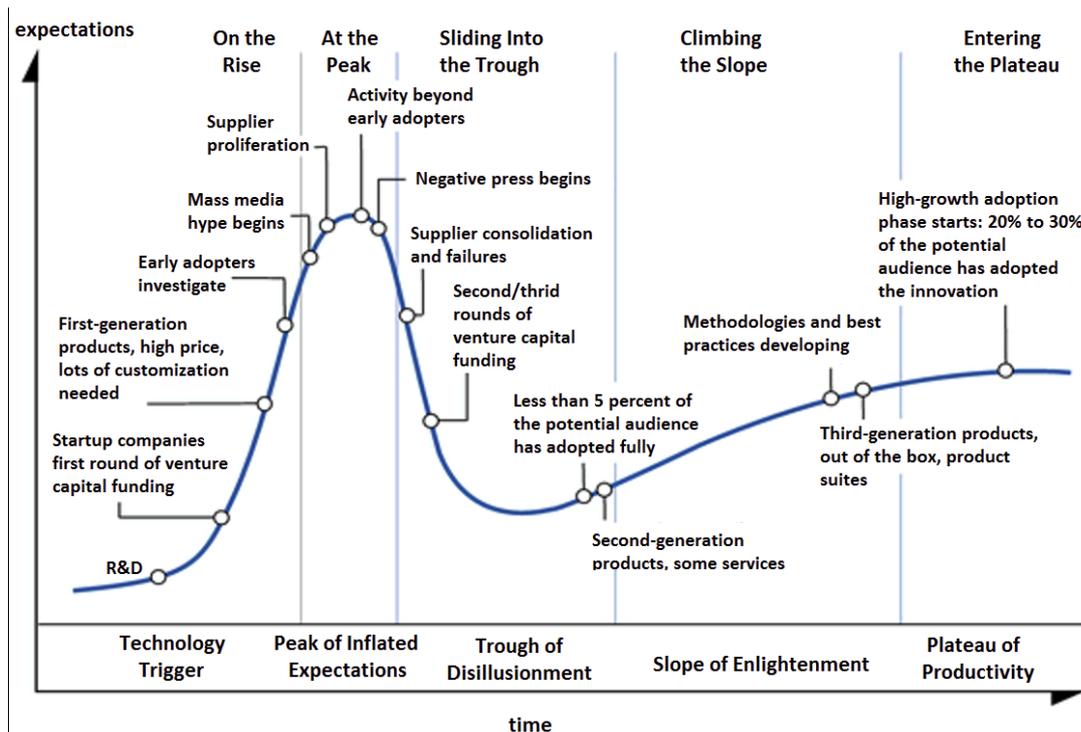


Figure 122 Exemple de Hype Cycle (Wikipedia, 2017a)

Pour nos projets, nous avons extraits le Hype Cycle 2014. Il en ressort un fort développement des unités mobiles sous la forme des véhicules autoguidés et des technologies de vol autonome. Ce sujet devient un des points centraux dans la détermination des projets de R&D sur lesquels nous avons travaillés.

Les indicateurs industriels que nous venons de voir reposent sur des mesures plus économiques que scientifiques. D'autres indicateurs interviennent dans les projets de R&D tels que les Verrous scientifiques et technologiques. Ils se définissent par toutes connaissances, données ou méthodes manquantes pour répondre à une problématique. Cette définition très théorique s'incarne lors des évaluations de la recherche et dans notre cas lors du montage des dossiers d'appel d'offre ou lors des contrôles du ministère de la recherche. Les verrous identifiés sur un projet deviennent des objectifs à dépasser et donc des jalons pour les projets.

Niveau de maturité, modes technologiques et verrous scientifiques deviennent alors des passages obligés de la conception. Nous allons l'illustrer dans les cas d'études qui vont suivre et préciser les étapes au cours desquels ils interviennent et ce qu'ils impliquent sur la gestion des concepts.

2.2. Exemples de montage de projets de R&D pour la robotique de construction

2.2.1 Projets COSITROS et ROSCOF : De la robotique mobile au chantier

Nous décidons de répondre à un appel à projet de l'union européenne appelé ECHORD++ (European Coordination Hub for Open Robotics Development). Il s'agit d'un programme de recherche FP7 permettant la participation d'acteurs économiques de la robotique et finançant d'une part des lieux de rencontre de ces acteurs à travers des espaces d'expérimentation, et d'autre part des projets devant se rattacher à des thématiques générales. Robotique pour l'agriculture et l'alimentation, les

sujets de Cobotique, la robotique médicale, et les interfaces cognitives pour l'industrie. Nous pensons pouvoir bénéficier du programme de financement de projets en nous conformant aux attendus :

Projets concernés

- Projets scientifiques et/ou de développements technologiques en robotique
- De proportion mineure ou intermédiaire.
- Avec un impact évalué et maîtrisé.
- Projet porté par une entité dont l'expertise en robotique est reconnue

Entités concernées

- Enseignement et recherche, PME, grandes entreprises, Holdings
- Enregistré auprès de la commission européenne (2 semaines d'instruction délais) http://cordis.europa.eu/fp7/pp-pic_en.html
- Sous forme de partenariats de 2 ou 3.

Financement :

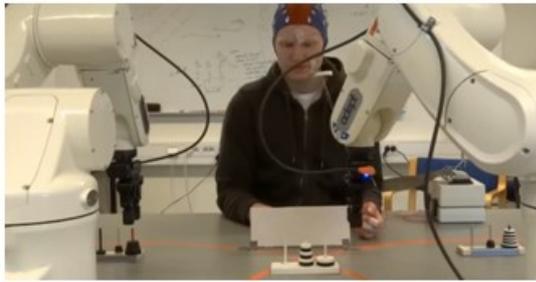
- Fourchette 300k euros
- Inclue les ressources humaines et le matériel
- Maximum 50% du budget attribué aux ressources matérielles
- Le coût net des investissements matériels sont pris en charge à 100% et payés d'avance.
- Pour les autres frais le taux de base de 50% des frais réels. A ceci s'ajoute une assiette de 25% payé d'avance pour les pme. (Voir Article II.16 du FP7)

Temps du projet :

- Appel d'offre ouvert jusqu'au 23 Juin 2015 !
- Démarrage 6 mois suivant le dépôt de dossier
- Expérimentation sur 12 à 18 mois

S'inspirer de projets précédant

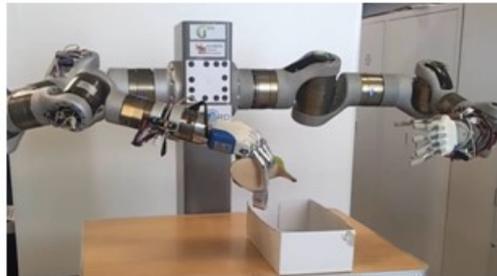
Au départ de notre projet nous sommes en partenariat avec une entreprise de robotique, et à ce stade nous n'avons pas de sujet défini. Nous connaissons évidemment notre objectif commun, à savoir développer la robotique de chantier. Pour aller plus loin nous devons explorer cette question à travers des exemples de recherches issues du programme de financement visé avant de fixer nos propres objectifs de recherche (Figure 123).



**Psylntec –
BITK, Suède**
Psychophysiological interaction
and empathetic cognition for
human-robot cooperative work



**KOMPEYE –
Robosoft (France);
Vicomech(Allemagne)**
Experiment Demonstration of behavior recognition
techniques



**UMHDE –
Lagal Shoes (Espagne); FRAUNHOFER (Allemagne)**
Hyper-flexible bimanual robot manipulation and packing of
deformable parts in footwear industry

Figure 123 Exemple de projets echord ++

Le projet Psylntec avait pour objectif d'étudier l'interaction entre un humain et un robot dans le cadre d'une résolution de problèmes en commun. Cette étude se penche principalement sur les appréhensions que peut avoir un être humain face aux robots, et les moyens d'apaiser cette relation. Le dispositif expérimental est composé d'un robot anthropomorphe et d'un sujet devant un jeu de réflexion tel que la « Tour de Hanoi ». Les réactions du sujet sont enregistrées grâce à un électroencéphalogramme. La célérité du robot est ajustée en temps réel, en fonction de ces réactions.

Le projet UMHDE cherche à explorer les capacités de mise œuvre d'un robot à deux bras pour l'emballage de produits. Ici le test est réalisé avec une chaussure qu'il faut attraper puis installer dans une boîte. Si la tâche paraît simple, elle est complexe à programmer. Les robots à deux bras requièrent un grand nombre de phases de calculs et de modélisations. De plus ce type de tâche demande la programmation d'outils de perception et d'algorithmes de décision.

Le projet KOMPEYE portait sur l'exploitation de la robotique mobile pour des applications d'accueil ou de gestion de public. Il s'agissait d'étudier les capacités de perception des comportements humains en développant des algorithmes de reconnaissance des déplacements et des émotions. Une deuxième partie de l'étude était d'y répondre de manière adaptée à travers des interfaces de communication.

Nous pouvons noter que ces projets traitent de problématiques qui touchent à l'industrie, mais sont encore loin d'être opérationnels du point de vue de la production. Leur développement est surtout motivé par les avancées sur le plan de la robotique et la question de son intégration dans des univers de travail. Nos objectifs de développement étant guidés par une intégration rapide sur chantier paraissent alors en décalage.

Définitions de sujets vers des applications en construction

Notre cheminement dans la détermination d'un sujet nous a permis de figer certains éléments. Nous désirions travailler sur un projet d'unités mobiles autonomes et de baser notre étude sur les moyens de programmation et d'interaction entre celles-ci et le personnel sur chantier. Cette réflexion nous l'avons déjà portée lors de nos expérimentations en mécatronique de conception. Elle nous avait permis de réfléchir aux applications d'outils déjà produits sur des chantiers au Japon pour le lissage de surfaces horizontales. Une autre réflexion sur le déplombage d'éléments de structures verticaux nous avait conduits à des réflexions sur l'usage de robot anthropomorphes. Le point faible de ces derniers est la mobilité, et il nous semble opportun d'associer ce type de tâche à notre sujet d'unités mobiles. Ces deux applications paraissent devoir faire l'objet de deux projets différents. Le premier s'appellera ROSCOF pour RObotic Solution for COncrete Finishing, et le deuxième COSITROS pour COnstruction SITe RObotic Shuttle.

Description initiale pour ROSCOF :

« Les travaux de lissage du béton sont courants dans la construction. Toute surface de plancher béton fini brut ou traité doit subir des opérations de lissage afin de respecter les normes de qualité de la construction. Ces tâches mobilisent une main d'œuvre conséquente, sujette au TMS.

Pour résumer, le projet se justifie par son impact possible sur l'accroissement de la production, l'amélioration de la qualité de l'ouvrage, la réduction des accidents et la diminution du nombre de tâches pénibles.

Le projet d'automatisation de ces tâches se fait dans la continuité de l'évolution progressive des techniques, aujourd'hui à différents stades selon les pays (cf: état de l'art). Des sujets correspondants aux résultats attendus pour ce projet ont déjà été réalisés, mais non commercialisés et non brevetés.

Dans d'autres domaines, le traitement des surfaces comme le polissage ou le nettoyage ont déjà abouti à des solutions

Il s'agira donc de réaliser un prototype opérationnel de robot mobile dédié aux travaux de lissage de surfaces béton après coulage. Les conditions chantier et les impératifs de la construction devront être pris en compte. »

Au-delà des perspectives de modification de la tâche définie, nous pouvons envisager l'adaptation pour l'exploitation des systèmes qui seront développés à toutes les opérations de traitements des surfaces »

Description initiale pour COSITROS :

« Le monde de la construction ne semble pas suivre les autres industries dans l'intégration de la robotique au sein de son processus de production. Diverses tentatives ont poussé à l'introduction de la robotique sur les chantiers, mais ces méthodes ne semblent pas se généraliser.

La robotique industrielle standardisée se développe et devient de plus en plus accessible. Ainsi, ce projet de recherche pose l'hypothèse qu'une adaptation aux conditions particulières de production du cadre bâti, d'un robot anthropomorphe standard, pourrait permettre l'essor de ces technologies de manière durable.

Le système de la chaîne de production, à l'image de l'industrie automobile, ne peut pas être mise en œuvre sur un chantier, même si l'on peut le simuler en favorisant la préfabrication et la production hors site.

A partir de ce constat nous souhaitons développer :

-D'une part un système mobile permettant de rendre un robot industriel en capacité d'être installé et déplacé sur chantier pour répondre aux différentes situations potentiellement automatisables.

-A ce projet s'ajoute une phase de test réel sur une tâche bien définie (déplombage de structures métalliques par sablage) qui sera l'occasion d'une première conception d'outils adaptés aux spécificités de la production sur chantier. »

Identifier des limites à l'état de l'art

Nous ne prendrons ici que l'exemple du projet ROSCOF (lissage de surface aux interfaces de commandes)

Pour constituer l'état de l'art sur ce premier projet nous explorons d'abord l'état des connaissances que nous avons sur les méthodes traditionnelles de lissage de surfaces. Celles-ci sont très largement employées sur les chantiers dont notre entreprise a la charge. Nous pouvons alors faire le constat d'une variété de techniques, privilégiant le travail manuel, mais ayant une tendance à la mécanisation. Le tirage de chape en est un exemple (Figure 124). Le ciment est déposé, puis réparti à l'aide d'une règle de maçon, ou bien d'outils plus adaptés. Les truelles mécaniques, facilitent ce travail (Figure 125). Elles ne sont pas employées seulement pour les chapes, mais aussi pour le surfacage de béton nu. Ce type d'outil permet des conditions de travail plus ergonomiques.

Des brevets font état d'avancées dans le domaine de l'automatisation de ces outils. Nous observons rapidement que des avancées significatives sont faites dans l'automatisation des commandes des truelles mécaniques avec des systèmes de gestion des truelles.

Plusieurs paramètres sont déjà gérés sur des lisseuses hydrauliques autoportées. Ces outils ne sont pas autonomes, ils requièrent encore un pilote, mais les mouvements sont gérés par des commandes électroniques et non plus manuellement. Un premier brevet de janvier 2013 est déposé pour la gestion de la pression des pales sur les surfaces à traiter (Figure 126). Un deuxième brevet de mai 2013 est déposé pour la gestion de rotation des pales pour la fiabilisation des mouvements dans l'espace (Figure 127).

Enfin l'exploration de publications scientifiques dans le champ de la robotique de construction nous ouvre d'autres perspectives. Nous portons notre regard principalement sur les systèmes de commandes, les systèmes mécaniques et les moyens techniques employées pour l'automatisation. Les unités mobiles ne sont pas les seuls représentants. Des systèmes plus imposants tels que des portiques ont existé et reprennent la technique du tirage de chape (Figure 128). Si nous revenons aux systèmes mobiles, nous retrouvons des entités que nous avons déjà évoquées tel que le projet Soffito (Figure 129) et le robot Mark (Figure 130). Nous y complétons cet inventaire d'un autre dispositif, appelé Shamir (Figure 131). Chacun d'eux présente des systèmes mobiles avec des interfaces de commande et des techniques d'automatisation différentes. Soffito possède des capteurs lui permettant de repérer l'ensemble des caractéristiques géométriques de l'environnement dans lequel il se déplace. Le tout est ajusté en plan pour connaître la position du robot dans l'espace. Ce type de technologie est aujourd'hui courant et ne touche pas que le développement de la mécatronique.

Le robot MARK est dédié au même type de tâche que celle que nous visons. Ce robot est composé d'une truelle mécanique autoportée. Contrairement au projet Soffito, il ne possède pas de capteurs extéroceptifs. Son rapport avec l'environnement dans lequel il navigue se fait soit par l'intermédiaire d'un capteur de choc. La navigation d'un tel système est permise par une stratégie de déplacement en zig-zag le réorientant à chaque obstacle rencontré.

Le dispositif expérimental Shamir fait état d'une stratégie similaire à MARK. Il ne dispose par contre d'aucun capteur de son environnement. Ce système est développé pour la dépose de céramique. Ces éléments sont modulaires, il est donc plus évident de rendre ses déplacements systématiques.

Les méthodes traditionnelles :



Figure 124 Technique du tirage de chape



Figure 125 Truelle mécanique

Les brevets :

United States Patent
 Allen et al.
 Patent No.: US 8,360,680 B2
 Date of Patent: Jan. 29, 2013

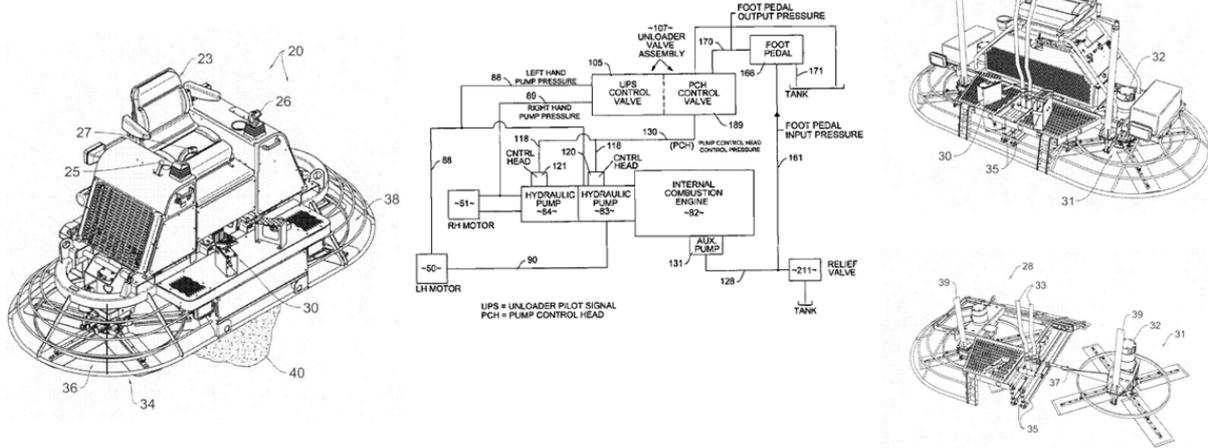


Figure 126 Détection automatique de la pression sur une lisseuse hydraulique autoportée (Allen & Al, 2013)

United States Patent Application Publication
 HANSON et al.
 Pub. No.: US 2013/0129419 A1
 Pub. Date: May 23, 2013

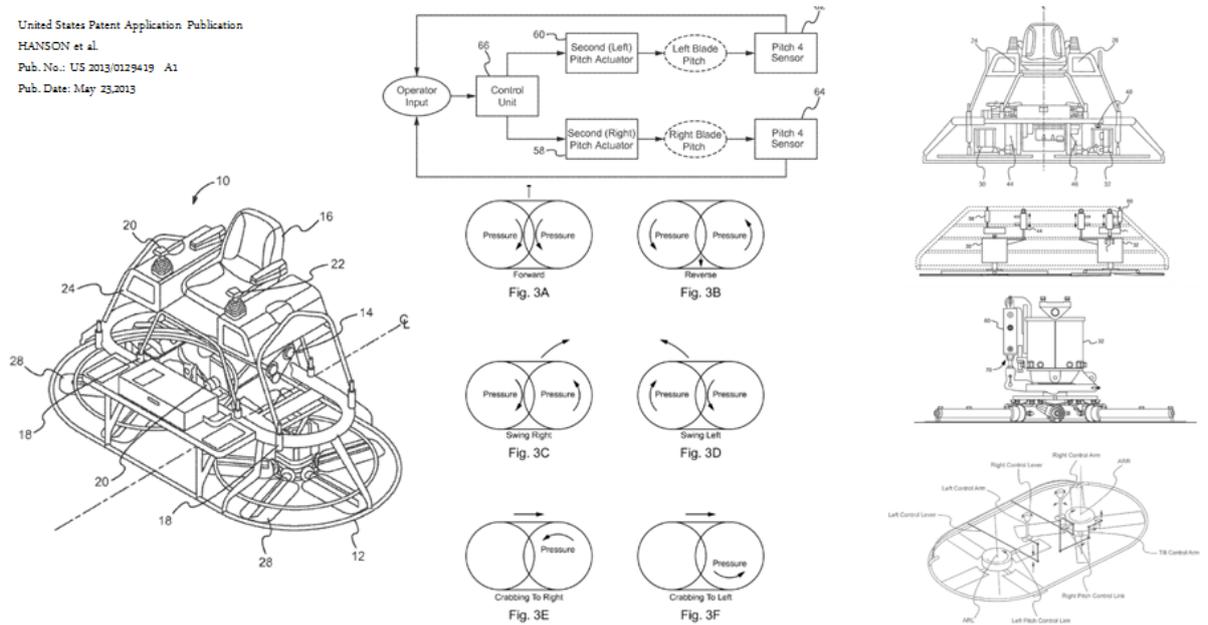
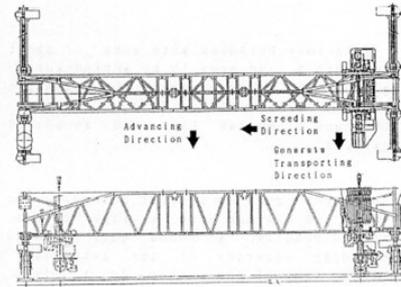
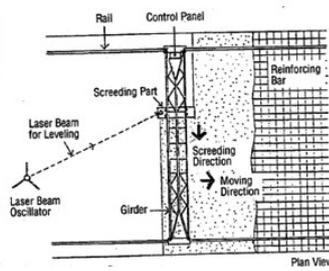
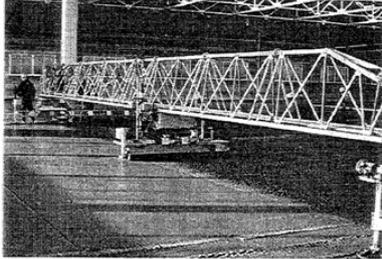


Figure 127 Contrôle automatique du tangage sur une lisseuse hydraulique autoportée (Hanson & Al, 2013)

Publications sur la robotique de construction :

SCREED ROBO 1



SCREED ROBO 3

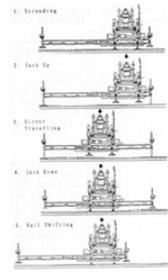
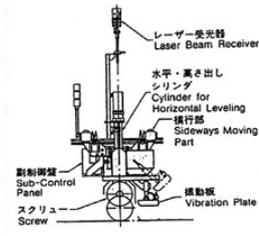
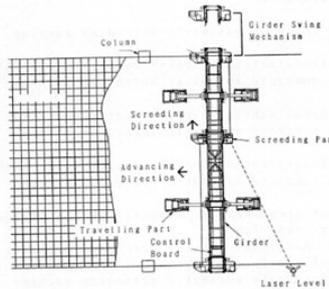
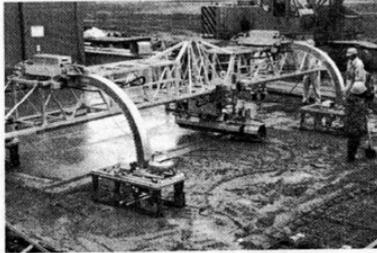


Figure 128 SCREED ROBO 1 & 3 pour le lissage de chape (Okuda, Yanagawa, Kawamura, Ochiai, & Aoyagi, 1992)

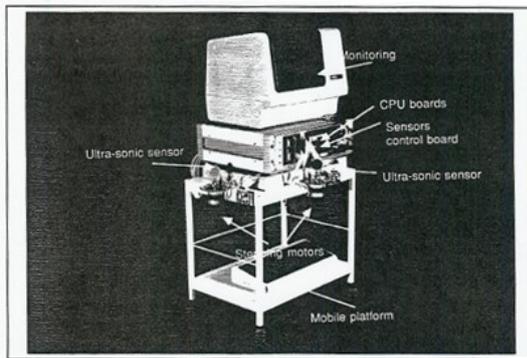


Figure 6. View of the experimental system.

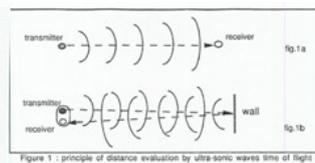


Figure 1: principle of distance evaluation by ultra-sonic waves time of flight

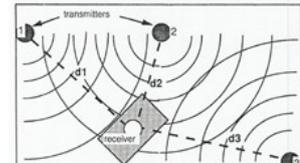


Figure 2. Positioning using active beacons in the surroundings.

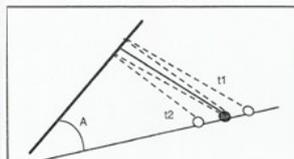


Figure 3. Angle and distance measurements using ultra-sonic sensors.

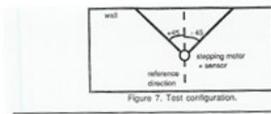


Figure 7. Test configuration.

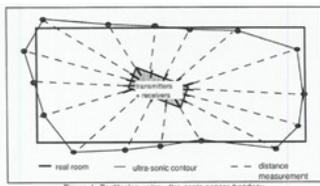


Figure 4. Positioning using ultra-sonic sensor bands.

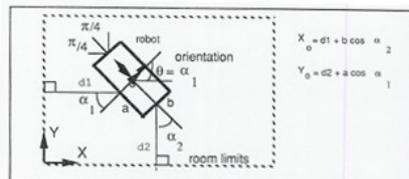


Figure 5 Positioning with ultra-sonic rotating telemeters.

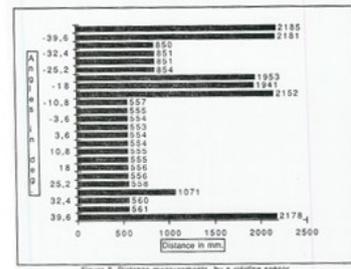


Figure 8. Distance measurements by a rotating sensor.

Figure 129 Soffito, guidage par laser d'unité mobile sur chantier (Salagnac et al., 1990)

MARK I

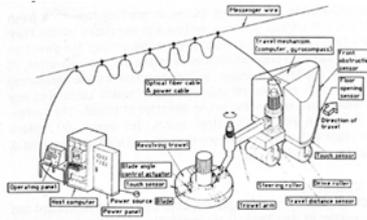


Fig. 2: Diagram of the Mark I Concrete Slab Finishing Robot

MARK II

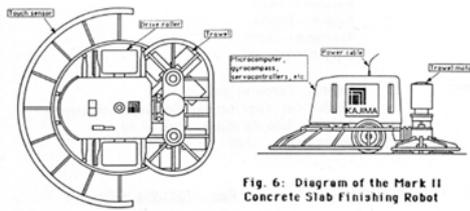


Fig. 6: Diagram of the Mark II Concrete Slab Finishing Robot

Prototype final

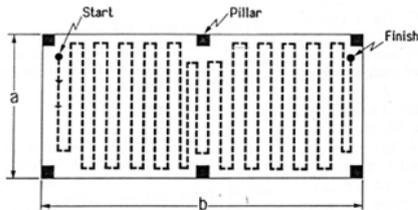
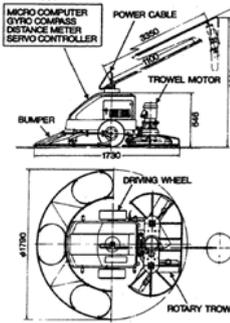


Fig. 5: Typical Operating Path of the Mark II



Photo 4: The Mark II (fully assembled)

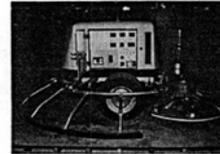


Photo 5: The Mark II (disassembled for transport)

Figure 130 MARK 1, 2 et 3, unité mobile autonome pour le lissage de chape (Tanaka et al., 1986)

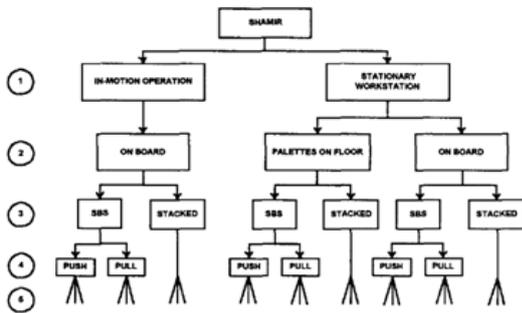


Fig. 3. Alternative conceptual design configuration: the top main layer—General.

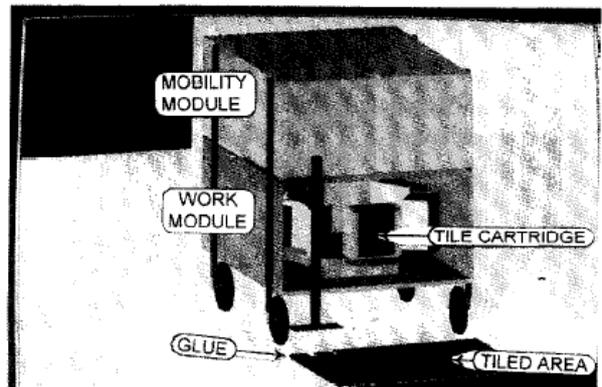


Fig. 6. An alternative design as modeled with the graphic simulation system.

Figure 131 projet SHAMIR pour la dépose de céramique (Navon, 1995)



Figure 132 ROBOTUS- Système autonome de guidage sur lisseuse mécanique autoportée (STRATEX FLOOR, 2014)

S'adosser à une technologie à verrous pour la robotique mobile

Nos deux états de l'art ont fait émerger un élément manquant, celui des interfaces de contrôle de la robotique mobile pour du personnel sans connaissances en programmation. Nous pouvons les réduire tous les deux à la gestion des technologies de modélisation et de localisation appelées SLAM. La tâche à gérer n'est évidemment pas la même dans le cas de projection de matériaux et dans celui de déplacement sur du béton liquide, mais cette stratégie nous semble pertinente.

L'entreprise de robotique avec laquelle nous sommes en partenariat évoque alors une technologie qu'elle ne maîtrise pas encore, mais qui fait état de recherches au moment de la constitution de notre projet.

Schématisation du processus :

Nous pourrions présenter le schéma du processus de conception de manière simple, comme nous le voyons sur la Figure 133. En vérité celui-ci ne fut pas aussi linéaire. Il est aisé d'identifier les éléments ayant une influence sur la conception, mais leur ordonnancement est complexe. Même en ayant vécu ces processus de conception, il est compliqué d'affirmer qu'un vecteur de transformation du concept a servi à justifier une transformation qui n'avait préalablement pas de pertinence forte pour le concepteur, ou si ce vecteur de transformation fut réellement générateur de nouveaux concepts. Il serait intéressant de pouvoir mesurer le poids de ces influences sur l'attribution d'une pertinence selon leur ordre d'arrivée dans le projet. Il serait aussi intéressant d'observer leur réel intérêt dans un projet de conception qui ne suivrait pas les règles d'un projet de R&D.

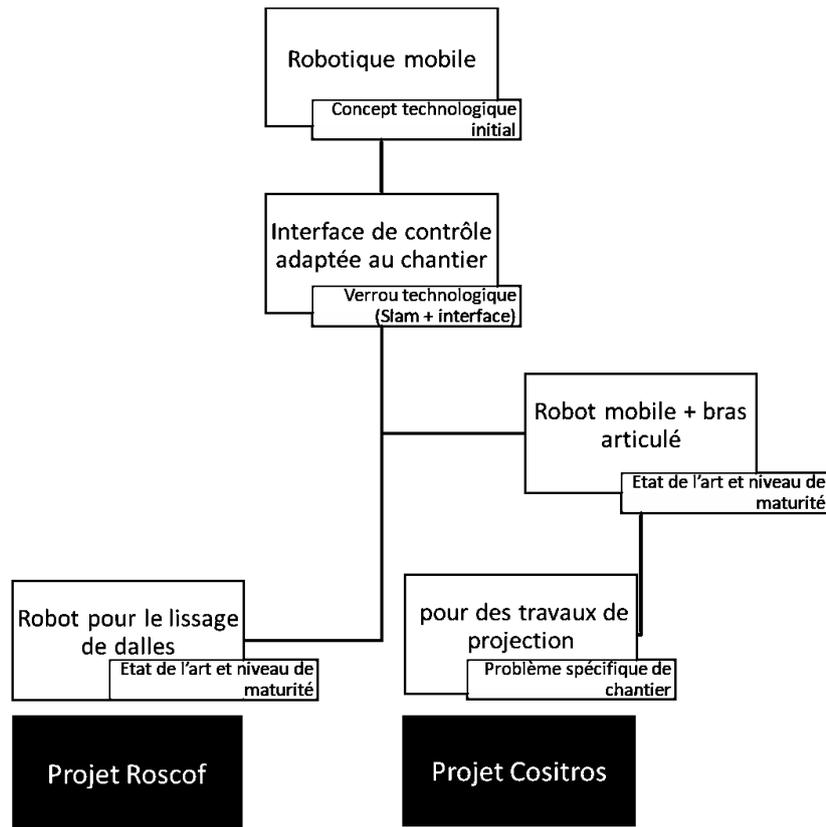


Figure 133: Représentation théorique de l'enchaînement de concepts et des influences sur les projets Cositros et Roscof

2.2.2 Des concepts de robotique de construction et leurs verrous technologiques

Les discussions autour de projets similaires ont continué avec le partenaire en robotique des projets COSITROS et ROSCOF. Plusieurs concepts ont alors émergé avec suivi d'un travail de réflexion dont l'objectif était d'identifier les verrous technologiques qui serviraient de base à leur développement. Nous allons présenter succinctement ces projets et le fruit des réflexions qui y ont été associées.

De la distribution de béton à l'évaluation du débit des matériaux non homogènes

Nos connaissances sur les outils robotiques génériques nous mènent vers un projet de développement d'un système automatisé de distribution de béton traditionnel pour assurer le coulage de dalles sur chantier. Des machines de distribution de béton existent déjà et sont employées sur chantier (Camions malaxeur, pompes et bennes à béton etc.). Leurs formes divergent selon l'emploi mais elles emploient toutes un système similaire pour déterminer la quantité de béton distribuée : l'utilisation d'un contenant dont le volume est connu. Or l'automatisation de ce type de système nécessite une mesure fine des débits de béton coulés.

Nos recherches sur le sujet nous orientent rapidement sur ce qui semble être le verrou principal de ce type de projet. Des études antérieures nous indiquent que les débitmètres pour les matériaux non homogènes n'existent pas et que le cas du béton donne des écarts entre 0,9 et 0,7 entre le débit estimé et celui constaté avec les outils existants. Le projet de prototypage d'une machine de distribution du

béton devient alors un projet de mise au point d'outils de mesure du débit des matériaux non homogènes avec comme cas d'étude celui du béton traditionnel.

Des mannequins de réservation à l'assemblage bois sans colle

Nous souhaitons développer des machines de découpe similaires aux machines à commandes numériques afin de produire les éléments de contreplaqués nécessaires à l'assemblage des mannequins de réservation des voiles et dalles béton. Nous savions déjà que l'ensemble des techniques de découpe par usinage étaient maîtrisées et que nous ne trouverions pas aisément de verrous sur ce projet. Les réflexions seront donc progressivement détournées avec d'abord des questionnements sur les techniques de production alternatives que nous pourrions employer. La production d'éléments par agglomération de copeaux, par thermoformage ou roto-moulage requièrent des machines complexes et difficiles à miniaturiser. Nous n'avons malgré tout pas identifié de verrou insurmontable concernant ces techniques pour notre sujet à développer. La réflexion se tourne alors sur des aspects environnementaux. Le découpage de formes standard permettant de réemployer les éléments découpés. La découpe de nœuds d'assemblage permettant de ne pas employer de colle. C'est ce dernier aspect qui fut retenu pour diriger la conception du projet.

Logistique automatisée – un sujet maîtrisé dans l'industrie que ne semble pas applicable au chantier.

Nous entamons des réflexions sur la base des systèmes automatiques employés dans les usines de stockage et distribution de marchandises. Leur utilité n'est plus à démontrer dans le cas des ventes de produit en ligne dont la mise à disposition auprès des services postaux est facilité par l'optimisation des bases de données et de la gestion physique des colis grâce à la robotique. Nous ne savons pas à ce stade si le sujet serait pertinent pour un chantier, mais nous avons des indices concernant son potentiel. Les chantiers font l'objet de nombreuses livraisons de matériaux et de matériel.

Les délais de production apparaissent très fréquemment dans les préoccupations des services d'étude et parmi les opérationnels. Des espaces de livraison et de stockage sur les chantiers sont systématiquement définis lors des études, mais laissés libres dans leur gestion par l'encadrement de chantier. C'est ce dernier point qui va nous alerter car s'il ne pose pas de verrou technologique, il semble indiquer une méconnaissance des règles qui régissent l'organisation de la logistique sur chantier. Les opérationnels ont bien sûr la maîtrise de ces postes, mais la pertinence du concept que nous leur proposons leur échappe. Il correspond à une organisation différente de la production qu'il faudrait ajuster aux contraintes du chantier, ou modifier l'organisation du chantier pour rendre ce concept pertinent.

Coffrage automatisé – une aventure déjà entreprise

Ce projet d'automatisation de mise à l'aplomb des banches et de la mise à niveau des coffrages de plancher fut évoqué lors du travail effectué sur les microcontrôleurs. Ce fut d'ailleurs un des rares succès de définition complète de concepts mécatroniques associés aux concepts de mise en œuvre de la construction que nous avons pu mener lors de ces phases d'expérimentation. La réflexion s'est donc poursuivie dans le cadre de ces projets de R&D afin de pousser le développement d'un de ces outils.

Les recherches sur l'état de l'art scientifique n'ont pas permis d'identifier de verrou car l'ensemble des techniques nécessaires au développement de ce type d'outil sont connues. L'exploration des bases de données de brevets a par ailleurs fait ressortir plusieurs systèmes similaires dont certains sont

exploités au sein de produits accessibles sur le marché. L'existence d'un produit similaire à celui déjà envisagé fut une raison suffisante à l'arrêt des réflexions sur le sujet et donc du processus de conception associé. On peut alors s'interroger sur la pertinence de ce raisonnement qui aurait pu mener à d'autres concepts dans un cadre plus souple pour la R&D.

En réalité ce projet s'est prolongé mais sous une autre forme. Nous verrons au sein de la partie qui traite des concepts associés aux problématiques de chantier que l'identification d'enjeux voisins de ce projet ont pu mener au prototypage d'outils trouvant leur pertinence dans le processus de production sans faire intervenir de mécatronique.

3. La robotique de construction initiée par les chantiers

3.1. Les impacts sur le raisonnement de conception

Notre méthode de recherche s'est caractérisée par une prise de fonction en tant que chargé d'étude R&D avec la mise en place d'un service dédié à la robotique de construction. Cette identification par les acteurs de la construction sur notre terrain de recherche nous a conduits à participer à des réflexions sur la mécatronique de construction que nous n'avons pas initiées. Ceci s'est fait par le biais de commandes venant des chantiers de l'entreprise, faisant intervenir les conducteurs de travaux ou les services d'ingénierie associés. Cette partie est censée nous permettre de dégager deux types de résultats. D'abord des éléments sur la perception de la mécatronique que peuvent avoir les acteurs de l'entreprise pour résoudre des problèmes concrets sur chantier. Ensuite des éléments sur le processus de conception d'un outil mécatronique en nous y confrontant directement.

De nombreux cas sont restés à l'état de projets. C'est parfois le fait de décisions purement matérielles. Parfois dû à l'existence de solutions plus facilement atteignables. Mais aussi par des blocages dans le processus de réflexion. Deux de ces cas nous ont conduits à des réalisations. L'un nous a permis de conduire un projet de prototypage de robot de chantier et d'observer un niveau de détails élevé sur le processus de conception de la mécatronique de conception. Le deuxième cas nous a fait sortir du domaine de la mécatronique et nous a donc permis d'entrevoir des limites au développement de cette dernière. Nous allons exposer uniquement les cas traitant de robotique de construction.

3.1.1 Un problème ne vient jamais seul

Les concepts posés ici sont faits sur la base de problèmes exposés par les chantiers. Les descriptions des concepts sont parfois succinctes et définissent une tâche à réaliser associée à un système imaginé. Nous avons pu constater que les processus de conception lancés sur cette base n'évoluent pas directement sur la question de la mécatronique, mais plutôt sur le système par l'évocation d'une suite de problèmes associés à celui proposé initialement. Nous avons pu observer ces réflexions sous la forme de débats ou d'itérations amenant à chaque fois une imbrication de problèmes faisant évoluer la place du concept initial et jouant sur sa pertinence.

En phase amont de ces processus, la tendance fut de retrouver les problèmes qui sont en surplomb. On arrive dans la plupart des cas au triptyque « coût, délais, qualité » détenu généralement par les ingénieurs d'affaire. La découverte de ces problématiques très générique ne se fait par immédiatement et parfois de manière détournée.

Arrive ensuite la phase de modélisation des concepts où nous observons des réflexions plus techniques sur la mise en œuvre. Ces redéfinitions des concepts se font par l'intermédiaire de remarques ou

d'interactions plus formelles entre des experts des tâches à automatiser et les équipes en charge de la conception des outils mécatroniques.

3.1.2 Disparition de l'évidence d'une solution mécatronique

Les concepts que nous allons observer sont tous issus d'une réflexion préalable sur une correspondance entre un problème constaté sur chantier et l'imaginaire d'un ou plusieurs acteurs de la construction concernant la robotique et l'automatisation. Pourtant certains concepts évoluent vers des solutions qui échappent au domaine de la mécatronique.

Les raisons principales sont que le problème visé ne nécessite pas forcément une automatisation. Par exemple, l'automatisation est envisagée pour répondre à des contraintes de phasage, ou d'accessibilité aux ouvrages. Parfois la conception d'outils mécaniques aux formes adaptées, ou la réorganisation de tâches permet d'y répondre plus simplement.

Certains cas, nous ont aussi montré que l'automatisation ne nécessitait pas de mécanique ou d'informatique car elle ne concerne pas l'ensemble de la démarche de production. Par exemple lorsque différents acteurs se répartissent les tâches de fabrication par éléments et/ou lorsque d'autres se chargent de la conduite et du contrôle.

3.2. Exemples d'intrication de concepts et de problèmes pour la robotique de construction

3.2.1 Dépose de pavés de verres : Contrôle de la sécurité des modes opératoires

Cette commande provient d'un de nos chantiers de réhabilitation nécessitant le remplacement d'éléments de remplissage constitutifs d'un plancher. Il s'agit de pavés de verres incrustés dans une trame métallique permettant la circulation dans les galeries de chaque niveau de ce qui fut un grand magasin (Figure 134). Ceux-ci sont en place depuis la construction de l'ouvrage au début du XXème siècle. L'usure de l'ensemble par la déformation de la structure, ainsi que les multiples travaux de maintenance rendent difficile les diagnostics sur le comportement de l'ouvrage lors de la dépose des pavés de verre.



Figure 134 Vue des circulations et des éléments à déposer

Nous sommes ainsi consultés par les acteurs responsables de la conduite de travaux sur cette tâche afin d'étudier les opportunités qu'offrirait la conception d'outils spécifiques employant de la mécatronique.

Voici un extrait des investigations préalables sur cette commande :

« Nous nous rendons sur site afin d'évaluer l'ensemble des contraintes. Même si ce type de construction n'est pas courant, nous ne voyons pas d'emblée le besoin qui mènerait à la conception d'un outil dédié. Par ailleurs, à ce moment, la formulation du besoin est encore floue. Nous ne savons pas si nous intervenons en diagnostic ou on conception d'une solution automatisée de démolition. Nous interrogeons les responsables de cette tâche afin de préciser le problème. Nous dégageons alors deux problématiques bien distinctes. La première se situe au niveau des inconnus concernant la force à appliquer sous les pavés de verre pour les extraire de la structure. Connaître cet élément aurait un impact sur les outils mécaniques à employer ainsi que sur la méthodologie. Le plancher inférieur, constituant la zone d'appui pour le décapsulage pourrait ne pas supporter la charge au moment de l'effort. De plus dans le cas d'une charge relativement faible à appliquer il serait envisageable de se contenter d'efforts manuels. La deuxième problématique se situe au sein d'une des méthodologies de dépose proposée. Pour réaliser la dépose des pavés de verre sur l'ensemble des étages, deux équipes devraient se coordonner. La première au niveau supérieur du plancher traité, doit récolter les pavés, tandis qu'une deuxième au niveau inférieur doit pousser les pavés vers le haut. Ces deux équipes doivent être mises en sécurité suivant la réglementation du travail. L'équipe du plancher inférieur doit être placée sur un échafaudage mobile et ne soulever les pavés de verre que de 15 cm pour garantir à l'équipe du plancher supérieur de ne pas se retrouver face au vide.

Nous devons ainsi trouver des moyens techniques capables d'aider à l'organisation, voire d'automatiser cette tâche. Nous débutons notre recherche de solutions par un état de l'art des machines pouvant y répondre. Nous ne trouvons aucune correspondance entre notre cas et les robots de construction existants alors. Nous devons donc entrer dans une démarche de conception. Pour la première problématique nous devons faire des propositions d'outils capables de fournir des informations sur les forces minimum nécessaires au démontage des pavés de verre. Nous proposons l'utilisation d'une balance lors de tests de démontage. La balance serait placée entre un étau et le pavé de verre. L'étau est mis en tension et nous notons la valeur maximale indiquée par la balance au moment du décapsulage. Cette solution simple nous éloigne de la commande initiale. Nous aurions pu nous tourner vers des développements d'outils spécifiques employant de la mécatronique. Combiner une balance numérique et un piston contrôlés par ordinateur.

Cette deuxième solution aurait facilité la réponse à la deuxième problématique. L'outil automatisant le relevé de l'énergie nécessaire au démontage aurait pu servir pour l'automatisation du démontage seul. Nous y aurions intégré les paramètres de nos tests afin de fiabiliser cette tâche. »

Toutes ces réflexions furent peines perdues car une solution plus radicale fut employée. Pour contourner l'ensemble des problèmes, Les pavés furent cassés et non décapsulés grâce à un engin de démolition contrôlé à distance.

Cette première commande nous a permis d'entrevoir quelques caractéristiques fondamentales de ce type de situation de conception. Le sujet de la mécatronique semble être perçu comme porteur d'un grand potentiel pour les résolutions de problèmes de chantier, néanmoins nous constatons assez rapidement que ce type de réflexion peut se faire au détriment de solutions plus directes. Nous constatons aussi que la mécatronique nous pousse grandement vers des démarches de conception. Le

simple choix d'un robot sur catalogue est peu approprié. Nous aurions dû réaliser dans son ensemble un projet de robot de démontage de panneaux de verre.

Troisièmement, nous constatons que nous nous orientons plus facilement vers des solutions n'employant pas de la mécatronique. Toutes les commandes auxquelles nous devront faire face pourront être réalisées avec ou sans mécatronique. Passons-nous à côté d'un réel sujet de mécatronique, par soucis d'opérabilité ? Nous allons devoir construire un point de vue sur ce qui rend essentiel le passage vers la mécatronique.

3.2.2 Fabrication d'une résille monumentale : la complexité des formes gérée par des robots ?

Nous devons produire des éléments métalliques servant de séparation dans un espace extérieur (Figure 135). Ces éléments suivent le dessin de l'architecte, et sont soumis à certaines exigences en terme de qualité de réalisation. Ils doivent être produits d'un seul tenant, sans joints et sans différences d'épaisseur.



Figure 135 Représentation architecturale de la résille

L'ingénieur d'étude de prix chargé de remettre une offre sur cet élément ne peut répondre précisément car aucune technique à sa connaissance ne permet de réaliser ces éléments suivant les exigences de l'architecte. Nous sommes donc consultés afin de faire des hypothèses sur les techniques de fabrication disponibles. Le moulage des pièces nécessite la mise en place d'angles sur la pièce pour permettre son extraction. La découpe laser ne permet pas de découper des pièces de cette épaisseur. La découpe jet d'eau peut provoquer des déformations. Le fraisage est trop long. La fabrication additive est envisagée, mais reste très peu maîtrisée dans le monde de la construction.

Ces techniques emploient toutes de la mécatronique et paraissent des solutions évidentes, mais aucune n'est jugée viable pour la fabrication des éléments tels qu'ils ont été dessinés. La conception d'un système de fabrication dédié à ce type d'éléments est jugée peu viable économiquement. Le projet s'arrête donc sur des propositions de variantes de conception architecturales ou de fabrication manuelle.

3.2.3 Coffrage glissant en réhabilitation : reproduire l'automatisation des chaînes de production sans l'économie d'échelle ?

Le chantier concerné est une réhabilitation lourde d'un espace commercial. Les circulations verticales doivent être remises aux normes et sont donc partiellement détruites puis étendues par la construction de voiles neuves. Ces voiles en béton ont été étudiées en amont du chantier. La méthode de construction prévue doit se faire par éléments de coffrage traditionnels. Les éléments de coffrage traditionnels sont de grande dimension. Ils doivent donc être installés puis récupérés en passant par des accès aménagés sur le chantier. Le planning de chantier laisse peu de marge de manœuvre sur cette tâche, et pour prévenir tout contretemps ou superposition de tâches il faudrait accélérer sa mise en œuvre. De plus il faudrait automatiser cette tâche pour ne pas mobiliser de main d'œuvre supplémentaire.

Les équipes d'étude d'exécution imaginent pouvoir installer un système de coffrage glissant. Cette technique est connue, elle est adaptée à la réalisation d'ouvrages neufs de grande hauteur. Un coffrage placé sur des vérins monte progressivement au rythme du coulage et séchage du béton. Cette technique paraît automatisée, mais en réalité requiert une main d'œuvre qualifiée pour la pose des aciers. De plus, l'encombrement du matériel de coffrage est plus important qu'un coffrage par banche, en bois ou par panneaux.

Nous sommes donc consultés pour trouver des solutions d'automatisation de cette méthode de fabrication, voire de son remplacement. Par exemple l'impression 3D sur site de ces éléments est présentée comme une solution potentielle.

Ce projet ne nous a pas amené à formuler des réponses complètes en rapport avec la problématique du chantier. Très rapidement certains éléments nous ont poussés, ainsi que le chantier, à reconsidérer l'intérêt d'un tel projet. Le coffrage glissant ne nous paraît pas adapté car son coût ne serait pas amorti. Les voiles coulés ne sont continus que sur quelques étages. L'impression 3D quant à elle ne permet pas de produire les éléments désignés avec le rendu architectural souhaité. Finalement des éléments préfabriqués ont été installés pour des raisons économiques.

Ce projet est un autre exemple de la perception de la mécatronique en entreprise de construction. Ses aspects d'automatisation et de rapidité de production laissent penser qu'ils sont une solution au problème visé. Ici la contrainte économique est plus importante que la contrainte technique. Elle met donc fin au processus de conception.

3.2.4 Pose de menuiseries métalliques par l'intérieur : réduire l'impact des installations de chantier

Il s'agit d'un problème intervenant au cours de l'appel d'offre sur projet de construction neuve de bureaux. Un système de fenêtres sur des doubles hauteurs est imaginé par les architectes pour réduire le nombre de ponts thermiques et créer une esthétique singulière. Les services en charge de l'étude de cette façade souhaitent développer un système automatisé de pose de ces éléments par l'intérieur du bâtiment. La cinématique de pose devient complexe, car l'espace nécessaire au déplacement des menuiseries impose un grand nombre de rotations qui ne sont pas forcément intuitives.

Des outils de levage pour l'aide à la pose de ces éléments existent. Ils permettent de réduire l'effort, et deviennent indispensables lorsque le poids des vitrages ou des menuiseries dépasse certains seuils. Ces outils mécaniques pourraient être programmables, à l'image des robots anthropomorphes présents en usine. La solution d'intégration d'éléments de mécatronique paraît donc évidente. Il ne reste plus qu'à définir un budget et les moyens de mise en œuvre de ces outils.

Il s'agit d'un cas que nous avons pu observer lors de nos expérimentations sur l'impression 3D comme outil de conception. La réflexion sur ce cas fait donc l'objet d'une attention particulière avec des enjeux qui ne portent pas seulement sur l'automatisation. Nous découvrons rapidement l'origine du concept pour lequel nous avons été mobilisés.

Tout d'abord l'emprise des échafaudages et leur impact économique. En effet, une pose par l'intérieur permettrait de se soustraire à l'installation d'un échafaudage qui serait installé uniquement pour la pose de la façade. Ce dernier a un coût non négligeable et requiert un espace pour être déployé.

Ensuite parce que la charge de la grue ne peut absorber de nouvelles contraintes pour la gestion de la production. La grue est l'élément de levage de prédilection, en particulier sur les chantiers neufs pour lesquels elle sert le plus souvent de base à l'organisation de la production. Les délais de production sont alors liés à l'activité maximale de la grue. Le fait d'impliquer la grue dans la gestion de moins d'éléments est un moyen de réduire les délais de production. La gestion du temps de réalisation de ce chantier est donc une des origines du concept de pose par l'intérieur.

Ces sujets de coûts et délais deviennent alors la véritable pertinence attribuée au concept d'automatisation de la pose par l'intérieur. Le processus de conception observable s'est arrêté à ce point. Nous ne pouvons donc pas décrire les évolutions de ce concept. Nous avons néanmoins des pistes sur la gestion de ce type de projet par l'imbrication de problèmes.

3.2.5 Automatisation d'une table coffrante : Gestion locale d'un positionnement géométrique dynamique.

La structure du bâtiment concerné est composée d'une ossature métallique associée à des dalles de béton. Pour réaliser ses planchers l'ossature est mise en œuvre puis les dalles de béton sont coulées de poutre à poutre. Ces éléments sont modulaires et répétitifs, ce qui favorise des réflexions sur la production d'outils systématisant la production. Les responsables de l'étude du chantier décident donc de concevoir une table coffrante (Figure 136). Une série de paramètres à gérer les poussent à nous consulter pour évaluer le potentiel de solutions mécatroniques sur cet outil.

L'ossature métallique est mise en tension avant le coulage en prévision de la masse que vont générer les dalles de béton une fois mises en place. L'altimétrie n'est donc pas la même au coulage et lors de la levée de réserve. Elle n'est par ailleurs pas la même à chaque point du bâtiment. Des modèles de calculs permettent de prévoir la flèche entre le moment de la construction de l'ossature et lorsque l'ensemble des dalles de béton seront coulées. Mais ce modèle ne comprend pas chaque étape de coffrage.

Les tables coffrantes sont des systèmes classiques dans la construction (Figure 136). Elles facilitent la mise en place des coffrages horizontaux. Mais un paramètre de l'ouvrage vient perturber cette méthodologie. Les panneaux de coffrage ne sont pas mis en butée sur l'ouvrage, mais à une distance prédéfinie par l'architecte pour des considérations esthétiques.

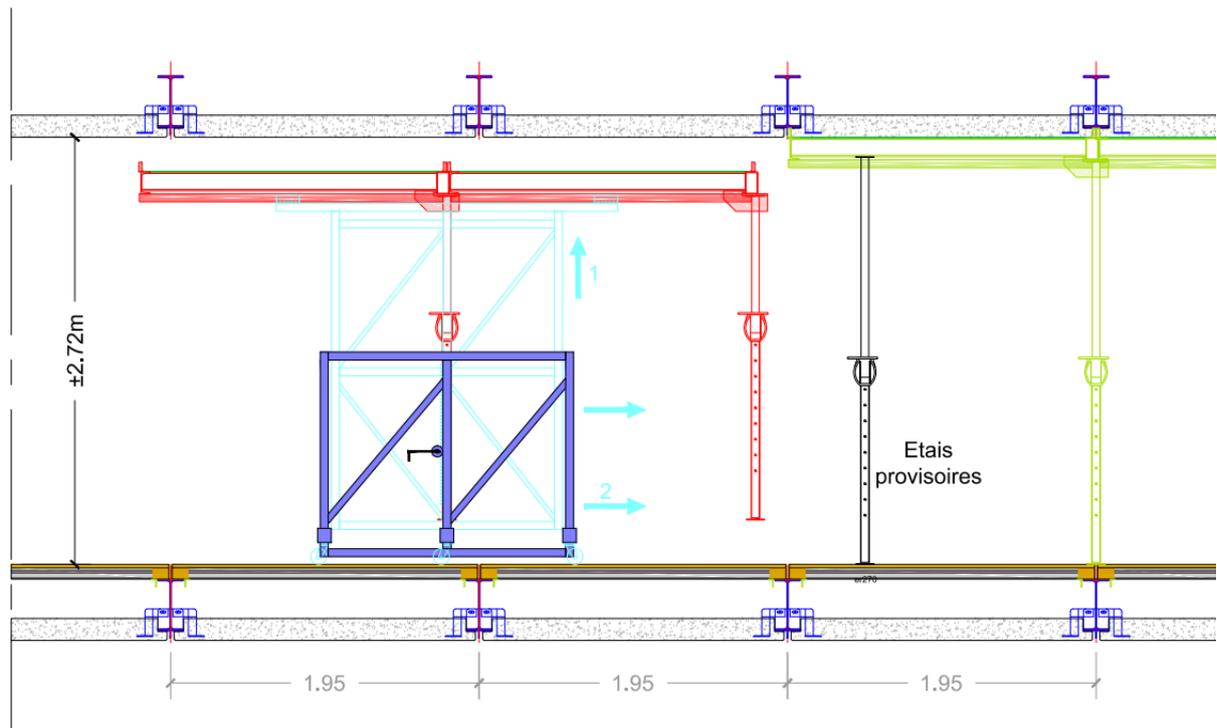


Figure 136 Dessin technique du mode constructif par table coffrante

Cet ensemble de paramètres fait que la pertinence de la méthodologie envisagée est difficile à évaluer. Le recours à la mécatronique n'est pas là pour automatiser la manutention, mais le réglage de la table lors de la mise en place. Le problème semble simple, mais l'ordonnance des paramètres n'est alors pas fixée par les équipes chargées de la conception de l'ouvrage. Nous allons donc devoir concevoir un système avec des paramètres fluctuants.

Nous avons déjà travaillé sur la question de l'intégration de la mécatronique dans les techniques de coffrage. Ce travail nous avait conduit à proposer des solutions simples composées d'étais motorisés et d'un couple laser / cellule photosensible en guide de capteur. Dans notre cas la configuration de pose ne permet par l'emploi de ce type de capteur. Nous imaginons un système de capteurs de distance placés en face haute de la table à chacun des angles.

Mais si l'on considère la première problématique, l'emploi de capteurs physiques de suffit pas. En effet nous devons prendre en compte le modèle de calcul de précontrainte pour ajuster la hauteur du coffrage en fonction de la masse de béton nécessaire. Nous proposons alors un système de nomenclature provenant du modèle pour commander la table.

Finalement la conception de ce système ne s'est pas faite, plus par manque de temps et de moyen que par manque pertinence attribuée au concept. Une solution de contournement a été mise en place avec une supervision journalière du positionnement des éléments par un géomètre.

3.2.6 Le robot de percement : Réduire la pénibilité

Le monde de la construction est soumis à diverses réglementations concernant la pénibilité sur chantier. Les tâches de percement sont sources de maladies professionnelles et nécessitent des positions de travail parfois peu ergonomiques pour les ouvriers. Le cas étudié dans ce projet de R&D est celui de percements multiples sur des ouvrages maçonnés et ferrailés (Figure 137). Ces percements

se font sur des hauteurs allant de 4 à 80cm pour une profondeur de 20cm. Cela impose des conditions de travail mettant en jeu la sécurité et l'ergonomie.



Figure 137 Méthodologie de percement pour la fixation d'une lierne sur une paroi moulée

Nous sommes alors missionnés pour produire un prototype de robot de percement adapté aux pratiques sur chantier. Nous cherchons des solutions d'automatisation partielle de ces tâches par l'intermédiaire d'outils mécatroniques afin de déporter l'action de l'opérateur, voire de le remplacer. Nous devons donc connaître les contraintes nécessaires au développement d'outils de chantier intégrant de la mécatronique. Définir des techniques de contrôle correspondant à la pratique ou potentiellement pertinentes vis-à-vis de la tâche visée. Maîtriser les aspects logistiques. Garantir la sécurité du personnel. Produire un outil viable selon les critères ergonomiques. Obtenir des résultats qualitatifs similaires à une réalisation manuelle

Un certain nombre de projets de robotique se sont déjà attaqués à ce problème. A l'étranger des recherches ont été produites principalement autour de la robotique à tâche unique au Japon. En France des prototypes ont été développés par la société Bouygues, sans arriver jusqu'au stade de leur commercialisation. Ces outils ne correspondent néanmoins pas à notre sujet car l'interface offerte à l'opérateur n'est pas adaptée à du personnel sur chantier et le type de tâches identifiées diverge notamment sur les hauteurs de percement

Dans une première approche, nous avons missionné un intégrateur en robotique en n'indiquant que les contraintes du projet pour développer. Ce cahier des charges fut la base d'une exploration de concepts en ingénierie simultanée, censée apporter un niveau de détails presque opérationnel par l'assemblage d'éléments de robotique standardisés (voir exemple Figure 138).

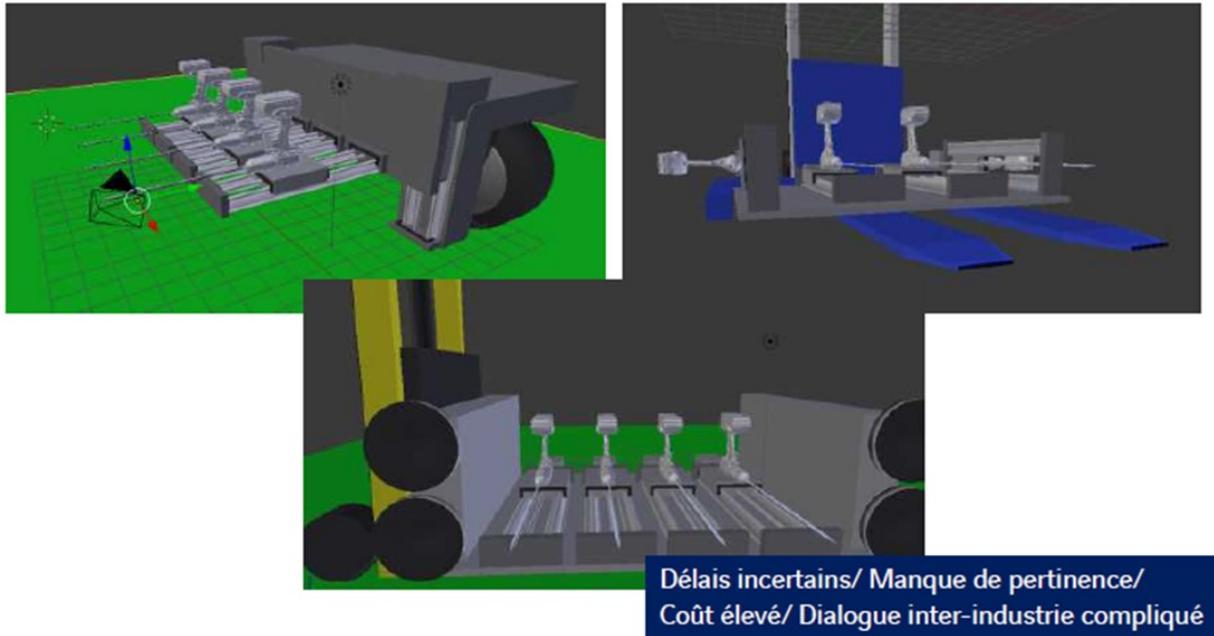


Figure 138 Exemple de concepts de robots de perçement réalisés en ingénierie simultanée

Ces représentations, bien que très poussées, n'ont pas permis de préciser le concept d'un robot de perçement. En effet, l'assemblage seul de technique et d'outils ne répondait pas aux questionnements principaux sur la commande, à savoir les modes de déplacement, l'interface de commande et le coût d'un tel projet.

Devant cet enjeu de maîtrise des concepts, nous avons fait le choix de reprendre la conception en part propre et de définir avant tout les compétences minimum et l'enveloppe budgétaire pour la réalisation d'un prototype. Très rapidement, le projet prend forme, sous l'aspect d'un robot mobile à 3 axes, dont deux sont dédiés aux mouvements d'un perforateur et le troisième à un déplacement linéaire (Figure 139).

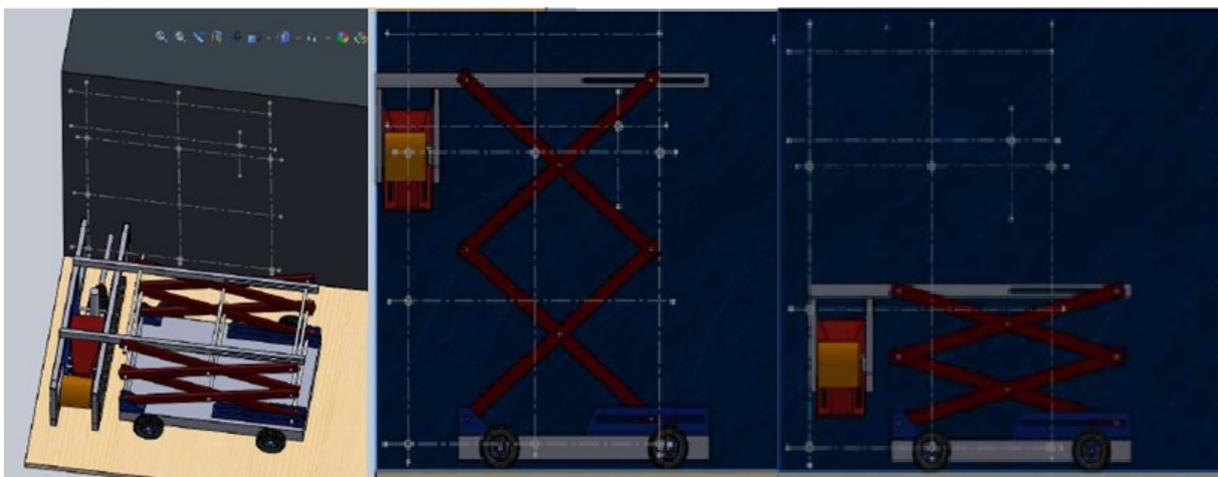


Figure 139 Modélisation du prototype de robot perceur réalisé en part propre

Les éléments de mécanique et de contrôle sont ajustés au cours du projet en gardant la cinématique comme échelle principale, plutôt que les éléments standards de robotique disponibles. La production du prototype est accompagnée du développement de son interface de commande (Figure 140), logicielles internes, ainsi qu'un protocole de communication et le choix des capteurs.



Figure 140 Interface de commande pour les tests de mouvements et interface de contrôle pour les tests de prise en main chantier

La troisième phase est une optimisation du prototype pour garantir les essais dans un environnement significatif. Des tests de précision et de fonctionnement sont réalisés à chaque étape, jusqu'à un déploiement sur chantier (Figure 141).



Figure 141 Prototypes physiques lors des tests en laboratoire et sur chantier

Nous verrons plus en détail le processus de prototypage de ce cas dans le chapitre suivant. Il s'agit de l'un des cas les plus aboutis et nous développerons une analyse par les sciences de la conception pour identifier plus précisément la structure de son processus de conception.

4. Synthèse

Dans ce chapitre nous souhaitons étudier la génération de concepts de robotique de construction par l'inventaire de problèmes liés aux chantiers ou de solutions possibles dans l'univers de la mécatronique. Nous venons de voir deux modes de projets, qui ne sont pas forcément plus fertiles que ceux explorés via la mécatronique de conception, mais qui ont la vertu de s'insérer plus facilement dans le fonctionnement d'une entreprise de construction. La conception d'outils mécatroniques via des approches technologiques qui présupposent une approche ascendante face à la remontée spontanée de problématiques. Ces deux modes de conception s'articulent différemment avec un même objectif. Celui de faire converger problématiques constructives et solutions mécatroniques.

Les projets de R&D top down subissent un cadre imposé, composé d'indicateurs subjectifs concernant la maturité des projets et l'identification de limites à l'état de l'art. Ceux-ci orientent les projets vers des objets de recherche plutôt que développement. Il y a donc une multiplication des influences externes au projet, qui lui donnent une richesse, mais peuvent le faire dévier de ses objectifs initiaux se rapportant à la conception d'un outil. Nous avons pu lister quelques exemples de verrous scientifiques et techniques employés dans la justification de ces projets : la localisation et simulation en temps réel, les contraintes des assemblages bois sans colle, le débit des matériaux non homogènes, l'automatisation de la logistique hors site. Ceux-ci ont pu s'adosser à des projets d'automatisation du traitement des surfaces, de distribution du béton ou encore de fabrication des mannequins de réservation. La convergence vers des problématiques de chantiers s'opère donc bien et doit être maintenue pour garder la pertinence du projet. Très vite deux projets parallèles pourraient apparaître. Un choix entre conception et recherche deviendrait important pour ne pas multiplier les moyens nécessaires au développement de la robotique de construction.

Du côté de la remontée de problématiques spontanées, les solutions de robotique sont rapidement évidentes, si la problématique est bien formulée. En effet nous avons pu observer deux difficultés. D'abord celle d'identifier la nature du problème et son environnement. Ensuite les multiples possibilités de contourner le problème principal. La robotique et essentiellement l'automatisation nécessitent d'identifier l'ensemble d'un processus de fabrication. Or chacun des sujets remontés fait apparaître un seul aspect de l'ouvrage à construire et souvent le plus problématique pour l'acteur qui l'initie. Avec ce travail sur les concepts nous avons pu trouver quelques exemples qui nous semblent porteurs de sens dans le développement de la robotique de construction. La réduction de la pénibilité, la complexité des formes, la mise en place des cadences d'usine sur des ouvrages uniques, la réduction de l'impact d'installations de chantier, l'automatisation d'un positionnement géométrique dynamique face à des exigences techniques de plus en plus grandes.

Il y a maintenant matière à produire de nouveaux concepts de robotique de construction ou à reprendre ceux évoqués dans ce chapitre, lorsque les conditions économiques le permettront. Nous connaissons à présent les grandes articulations de ce type de projet et les potentielles interférences.

Chapitre 3. Vers des méthodes inspirées des sciences de la conception.

Les résultats de nos différents cas d'études nous ont permis d'observer les éléments structurant la génération de concepts de robotique de construction et les phénomènes qui y sont associés. Nous avons rencontré des difficultés à représenter ces phénomènes et les expliquer. Nous nous sommes alors penchés sur les outils de modélisation des processus de conception issus des sciences de la conception. L'objectif est de produire des connaissances transmissibles sur les composantes fondamentales des processus de conception observés.

Nous avons pu voir que l'introduction du champ de la mécatronique vers celui du chantier implique une gestion de nombreux champs de connaissances. Ceci provoque autant de situations de choix à faire dans l'inconnu et donc un effort particulier pour un milieu professionnel forgé pour la résolution de problèmes.

Nous avons aussi pu observer l'introduction ponctuelle de raisonnements faisant référence à la conception architecturale. Celle-ci impose des priorités en matière de fabrication, mais donne rarement les clés de son propre fonctionnement. La mesure fixée grâce au système métrique n'indique pas les marges de manœuvres permises pour la production, provoquant des blocages où des incohérences dans les raisonnements purement constructifs. Connaître la conception architecturale peut donc être un moyen d'apprécier ce domaine.

Nous vous proposons ainsi deux analyses dont l'objectif est d'identifier les moyens de gérer les processus de conception de la robotique de construction. La première analyse, basée sur l'Architecturologie, permettra de développer la question de la mesure et la manière de l'employer dans ces projets. La deuxième analyse mobilisera la théorie C-K pour modéliser les processus de prototypage intervenant dans les activités de conception associées au projet de robot de percement.

1. Architecturologie – le continuum numérique par la mesure de l'architecte.

Le fait de s'intéresser à la mécatronique comme moyen de produire des outils de construction peut créer une confusion entre des domaines qui sont généralement séparés dans la pratique actuelle. Cette étude a donc eu pour objectif d'explorer la notion de mécatronique et de la rattacher à l'architecture par son processus de conception.

Notre travail nous a mené à prendre en considération la notion de mesure. La mesure est un élément important dans la constitution de l'Architecturologie. Cette notion se retrouve en mécatronique et reste un des fils conducteurs de la construction.

Nous cherchons à répondre à la problématique de lier conception architecturale et conception mécatronique en trois étapes. D'abord par la définition du cadre de la mécatronique fondamentale et appliquée à l'architecture au sens large du terme. Puis nous verrons comment la mesure intervient dans les descriptions et représentations de la mécatronique de construction, Pour arriver jusqu'à des logiques de conceptions de mécatronique de construction tenues par la mesure. Enfin nous reviendrons à l'architecture, par le biais de ce que la conception architecturale nous dit de la mesure et ce que cette compréhension de la mesure nous dit sur la conception de systèmes mécatroniques appliqués à la construction.

La mécatronique est une logique de conception associée au secteur de la robotique. Mais pour arriver à son essence nous devons nous détacher de ce lien. Le terme de robotique est souvent employé pour parler d'objets qui intègrent de la mécatronique mais il n'est que le résultat d'un processus de conception dont la démarche associée est la mécatronique. Par extension l'objet produit par cette démarche devient soit un produit soit un outil mécatronique. La robotique industrielle et l'automation intègrent la mécatronique comme moyen de fonctionnement. Vous l'aurez compris, le terme robot n'est pas un abus de langage, mais nous devons aller vers la mécatronique, pour discuter des enjeux des démarches de conception des outils et systèmes qui les composent.

1.1. Mesure et mécatronique de construction

La mécatronique de construction se conçoit à partir d'éléments existants dans le domaine de la robotique industrielle. L'ouvrage spécialisés sur la robotique de construction *Robot Oriented Design* (Bock & Linner, 2015) en décrit quatre catégories :

- La cinématique robotique, qui permet de modéliser le comportement de notre système mécatronique, afin de prévoir ses actions et le contrôler.
- Les actionneurs qui vont produire le mouvement sur les éléments mécaniques du système mécatronique. Le plus souvent des moteurs et pistons hydrauliques ou pneumatiques.
- Les capteurs et opérations de mesure. Qui vont servir à prendre une mesure et à l'interpréter.
- Les manipulateurs qui trouvent leur importance dans le cas spécifiques de la robotique industrielle, et notamment dans la production et l'utilisation de robots anthropomorphes.

Le même ouvrage explique la place de la mesure dans ces systèmes mécatroniques. La mesure est incarnée par les capteurs qui se divisent en deux catégories dites proprioceptives et extéroceptives. L'une est intégrée directement sur les éléments mécaniques et donne les mesures internes, tandis que la deuxième donne les mesures de l'environnement. La mesure est associée à un traitement, portée par la partie informatique. C'est cette étape qui crée une valeur utile à partir de la mesure absolue donnée par les capteurs. Nous pouvons ainsi repérer la place que prend la mesure au sein du système mécatronique, que l'on retrouve tant dans les éléments électroniques tels que les capteurs, mais aussi au sein des éléments mécaniques qui vont imposer leurs mouvements et leurs dimensions, ainsi que dans la partie logicielle qui traite ces informations.

Les représentations de la mécatronique de construction vont nous confirmer cette place que prend la mesure et sa prééminence dans la conception du système (Figure 142). Ces exemples de modes de représentations en mécatroniques de construction, tirés de la littérature scientifique, indiquent la présence de la mesure dans les processus de fonctionnement, dans la gestion de l'espace ou dans une organisation.

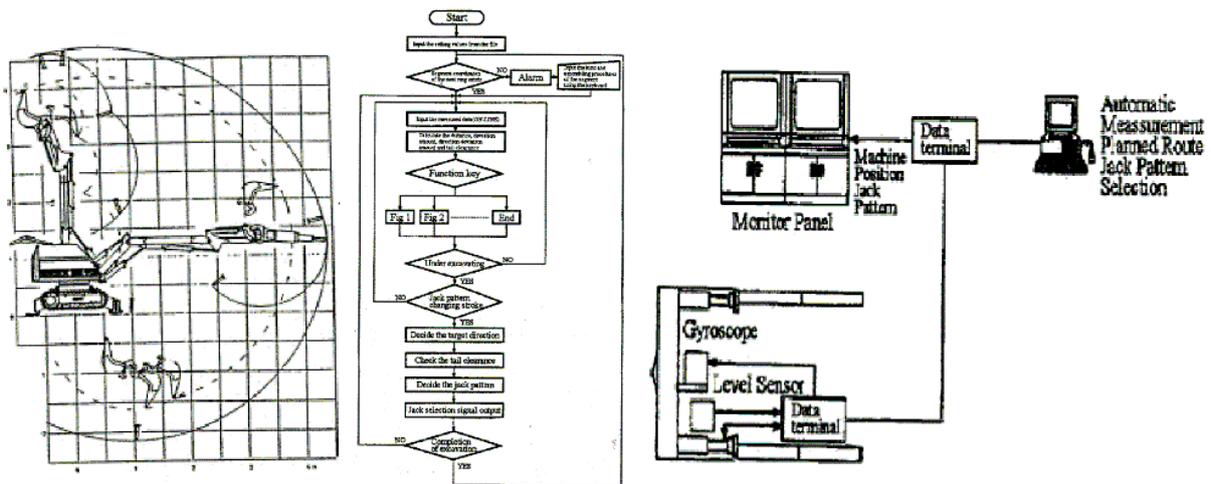


Figure 142 Eléments de descriptions de la robotique de construction((IAARC, 1998))

Nous pourrions multiplier les exemples de ce type grâce à l'état de l'art de la robotique de construction présent dans ce mémoire. Pour rappel ces observations de la place de la mesure dans la conception d'un outil mécatronique, nous avaient poussés à tester des méthodes de conception centrées sur la mesure. Innover dans la construction ne peut se résumer à cela car bien d'autres enjeux sont à prendre en compte pour le développement de la mécatronique de construction. Néanmoins notre démarche de recherche se prêtait à l'expérimentation par ce biais. Nous avons par exemple conduit ce raisonnement lors de la mise en place des ateliers de prototypages rapide sur des systèmes constructifs (Figure 143).

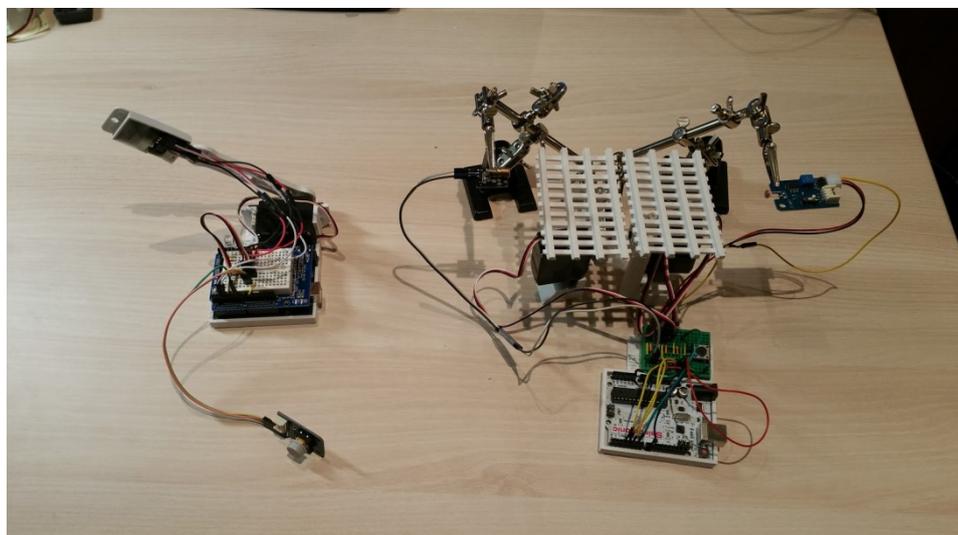


Figure 143 Prototypes de systèmes de coffrage automatisés.

1.2. Regard croisé entre Architecture et Mécatronique

L'Architecturologie dont l'objet est de « comprendre comment l'architecte attribue des mesures à l'objet architectural » (Boudon et al., 1994), développe trois concepts pour exprimer la nature de la mesure dans la conception architecturale. Elles sont décrites par leurs propriétés et l'emploi que

l'architecte en fait. On distingue la mesure élastique la mesure par la forme et la mesure proportionnelle.

Mesure élastique : « Elasticité et précision de la mesure » part du principe que « lors du travail de conception, l'objet n'existe pas encore [...] il est virtuel », « cette virtualité [...] permet d'envisager un ordre de grandeur de la mesure » (Boudon et al., 1994)

Mesure par la forme : « Forme et mesure » « Ce mot de mesure [...] doit en effet inclure l'idée que la mesure peut être donnée par la forme. » (Boudon et al., 1994)

Mesure proportionnelle : « Proportions et échelle comme modes de mesures », ou « l'idée de mesure repose sur la comparaison » (Boudon et al., 1994)

La nature et l'emploi de la mesure ne sont pas les mêmes en conception architecturale et en mécatronique de construction. L'architecte attribue des mesures à l'espace. De son côté l'outil mécatronique va pouvoir prendre des mesures dans l'espace et son action dépend de sa programmation. Néanmoins, Si l'on se pose du côté de la conception du système mécatronique et de sa programmation, nous retrouvons l'action d'attribution de mesure. Après avoir interprété la mesure du capteur, tout en prenant en compte l'effet mécanique, le programme va se charger d'interpréter et de restituer la mesure donnée par l'architecte.

Pour aller plus loin nous pouvons observer que la nature de la mesure selon l'Architecturologie peut se retrouver dans ce processus de conception de l'outil. Nous décelons dans nos cas expérimentaux des mesures par la forme, élastiques et des mesures proportionnelles. Nous pouvons le représenter par le schéma Figure 144.

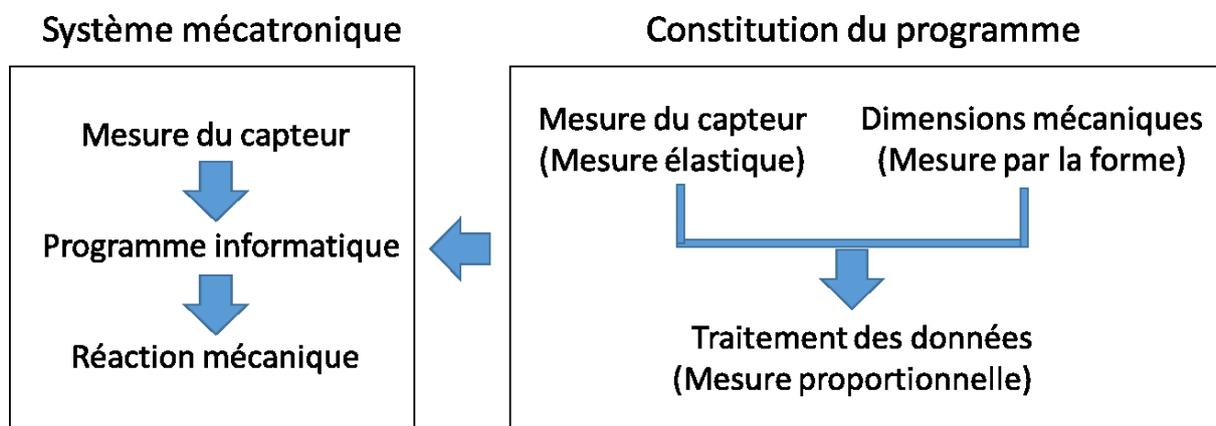


Figure 144 Analyse de la conception d'un outil mécatronique par la sémantique architecturologique

1.3. Vers une production de concepts basés sur la mesure

Ces constats peuvent nous amener à réinterroger l'ensemble des activités que nous avons observé. Connaître la mesure de l'architecte serait un moyen de conception de la mécatronique de construction, voire même de l'emploi de la mécatronique de conception. Cette connaissance lorsqu'elle est appliquée donne une pertinence à la conception de l'outil qui va bâtir et donc produire de l'architecture. Nous pourrions tenter la réflexion inverse en donnant une pertinence à l'architecture à partir de l'attribution de mesure issue de la mécatronique de construction.

Prenons par exemple le développement d'un système simple de pose de briques et regardons comment le jeu entre mesures architecturales et choix des composantes mécatronique. La brique est un module qui impose sa forme. Cette mesure par la forme a des implications dans la conception de l'outil de préhension. Le lien entre mesure par la forme et l'élément mécanique du système robotisé se retrouve bien ici.

La brique peut être posée le long d'une ligne, pivotée sur un axe, placée en hauteur... Cette élasticité de la mesure va avoir des implications dans le choix du système moteur/capteur. Suivant le degré d'élasticité choisi par l'architecte, le système de motorisation pourrait être un simple rail, un système cartésien ou un bras. Les orientations et la connaissance du placement dans l'espace impliqueraient la définition de tout autant de capteurs.

Puis l'architecte va définir un assemblage pour ces éléments. Des proportions sur le placement soit par rapport aux autres éléments, soit par rapport au terrain sur lequel ces briques sont posées. Une disposition en quinconce, en ligne ou sur un cercle nécessiteraient à chaque fois des instructions différentes. Ce système de proportions se retrouve donc dans le programme informatique et dans l'interface utilisateur. Suivant le degré de liberté laissé à l'opérateur, le programme pourrait être un simple bouton de démarrage du programme ou une suite de propositions de proportions.

Vous noterez que le programme informatique pourrait aussi contenir des notions de mesure par la forme et de mesure élastique. Cela est tout à fait normal, puisque ces notions précèdent celles de la proportion dans les choix de conception de ce type de système.

Poussons un peu plus la réflexion. Nous avons parlé de degré de liberté laissé par l'architecte au constructeur. Il se peut en effet que les ouvrages dessinés et figés sur le plan, ne le soient pas réellement dans les choix de conception. L'architecte pourrait choisir un module de brique au hasard, car ce qui compte pour lui est le principe de modules et non des dimensions exactes normées. Il pourrait choisir de les disposer au hasard et plus ou moins décalés par rapport à un axe pour donner du relief à son mur. Nous avons alors une élasticité de la mesure et des formes imposées pouvant intervenir à tous les niveaux.

En vérité si nous décrivons des systèmes en y associant systématiquement une correspondance entre tel élément de robotique à telle mesure architecturale, c'est qu'ils ont été pensés de cette manière. Chaque propriété de la mesure pourrait se retrouver à chacun des niveaux. Nous pourrions alors supposer qu'un système complet prendrait en compte l'ensemble des types de mesure architecturales sur chacun des éléments qui le composent. Un système ne présentant qu'un type de mesure par élément serait alors pauvre, mais donnerait l'avantage de nécessiter moins de moyens. Il faudrait alors trouver un équilibre dans la conception.

Nous ne pousserons pas plus la réflexion dans ce mémoire, mais nous invitons les futurs concepteurs de robotique de construction à tester cette théorie dans leur dialogue avec les architectes. Nous invitons aussi les architectes à penser leur système d'attribution de mesure et s'appuyer sur ces concepts d'Architecturologie pour transmettre leur pensée complète dans un continuum numérique. Nous invitons enfin, ceux qui désireraient allier architecture et mécatronique dans leur pratique, à articuler leurs réflexions sur la mesure et expérimenter de nouveaux liens entre forme, proportion, élasticité et outil, capteur/moteur, programme.

Nous n'avons pas exploré l'ensemble des concepts Architecturologiques, tels que les échelles ou les opérations fondamentales de conception. D'autres études permettraient sûrement d'enrichir cette proposition.

2. Théorie C-K – Modéliser pour analyser et modéliser pour concevoir.

Nous choisissons ici de nous intéresser au cas du robot de percement vu précédemment. Celui-ci fut le plus poussé dans son prototypage lors de notre recherche et nous donne ainsi le plus de matière à analyser. Nous souhaitons ici comprendre le déroulement de son processus de conception afin de le rendre reproductible sur d'autres formes de concepts et de l'optimiser le cas échéant. Ce cas nous semble intéressant car il a rempli toutes les conditions pour motiver son passage de l'état de concept à celui d'objet physique testé sur chantier. Cela ne veut pas dire que le processus de conception fut terminé, mais son état d'avancement nous permet de penser qu'il peut servir d'exemple pour d'autres développements.

La théorie C-K se présente comme à la fois une théorie de la conception et une théorie du raisonnement de conception. Cela veut dire qu'elle peut à la fois être un outil d'analyse et un outil de conception. C'est une des raisons pour lesquelles nous l'avons sélectionnée pour cette étude. L'autre raison principale, vient du fait qu'elle présente un regard sur la conception relatif à la gestion des connaissances. Nous avons remarqué de manière empirique que des phénomènes associés à l'introduction d'inconnues dans nos cas d'étude pouvaient être sources de blocages dans le processus de conception.

Le projet, étudié ici, connut trois étapes consécutives impliquant des expertises différentes. Une première étape de génération du concept n'a mobilisé que des équipes spécialistes de la construction face à un problème rencontré sur la conduite de travaux de percement. La seconde étape fut dédiée à la production de propositions de concepts de robotique censées répondre au problème et fit intervenir des équipes d'ingénierie spécialisées dans l'intégration de robotique. La troisième et dernière étape fut prise en charge par le service R&D de l'entreprise de construction avec pour objectif la production d'un prototype. Nous allons donc décrire les différentes étapes de conception du cas du robot de percement et les modéliser sous forme de diagrammes C-K. Pour cette description nous reprendrons la chronologie du projet, ses points marquants et les moyens engagés en termes d'expertise. Nous ne rappellerons pas ici les principes fondamentaux de la théorie C-K, déjà présents dans notre état des connaissances sur les sciences de la conception (cf. Partie 1 Chapitre 4)

2.1. La génération du concept

Ce projet fut à l'initiative des équipes d'un chantier de construction de parking. Le constat de la pénibilité présente lors des tâches de percement les a conduits à chercher des solutions. Parmi ces solutions, la robotique semblait être une viable tant pour assister que remplacer le travail manuel. Commence alors une récolte d'informations sur les outils existants ou des concepts proches présents dans d'autres domaines que la construction (Figure 145). Ceux-ci n'adressent pas totalement le problème et ne sont pour la plupart pas accessibles.

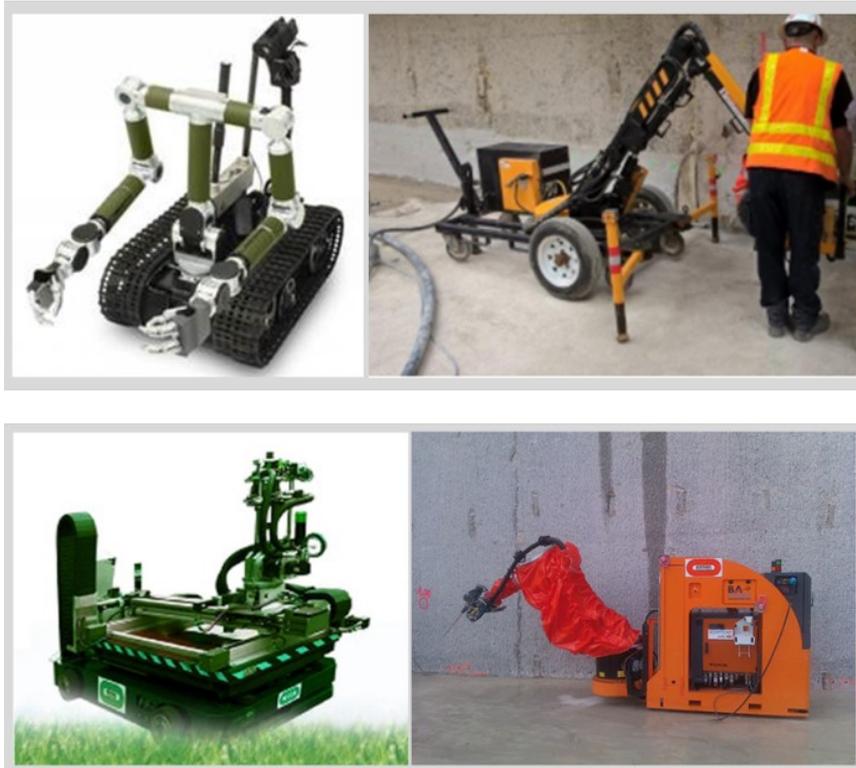


Figure 145 Illustrations s'approchant du concept de robot de percement

Cette absence de solution accessible déclenche la décision de se lancer dans un projet de réalisation et donc de conception d'un outil. Malheureusement, le manque de savoir-faire en termes de conception de robotique nécessite l'introduction d'une expertise supplémentaire. Le projet s'arrête ici sur la description d'un concept. « Un système robotique capable d'assister ou automatiser les tâches de percement sur des parois en béton »

La description préalable de ce projet ne semble pas assez riche pour produire une analyse. Néanmoins c'est cette étape qui apporte ses fondements au processus de conception. Nous avons extrait les grands champs de connaissances et le début de l'arbre des concepts pour les introduire dans une première modélisation suivant les principes C-K (Figure 146). Ceci nous permet de représenter les opérations de conception entre l'espace des connaissances et l'espace des concepts pour définir les caractéristiques de cette phase de génération de concepts.

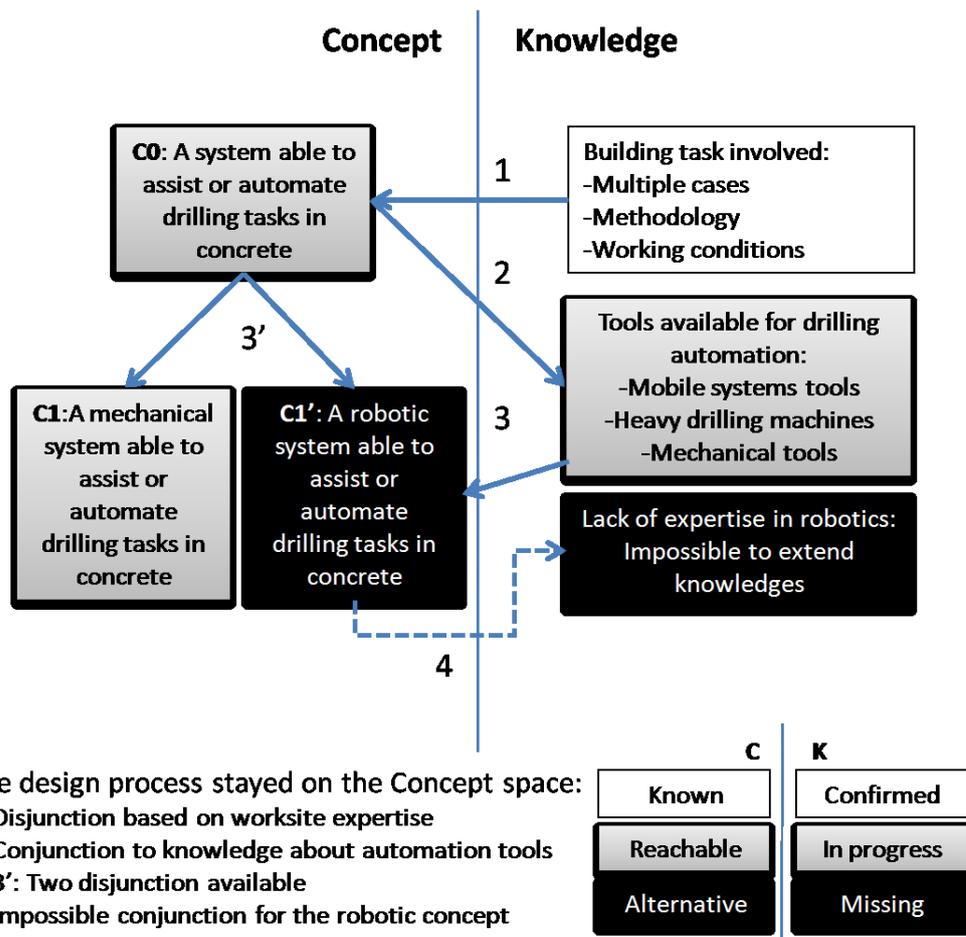


Figure 146 Modélisation C-K du processus de génération de concept

Nous remarquons que la relation entre l'espace des concepts et celui des connaissances est dynamique, même s'il y a peu d'expansions au sein d'un même espace. Nous remarquons aussi que le processus de conception n'est pas initié au sein de l'espace des concepts. Nous considérons ici que l'identification de la tâche constructive et des problèmes associés sont générateurs de concepts. Ceux-ci se situent dans l'espace des connaissances. Nous pouvons toutefois observer que l'orientation vers des concepts de robotique est un choix dans l'inconnu. L'espace des concepts est donc initiateur du projet et pousse à étendre l'espace des connaissances. Cet espace des connaissances, lui-même contraint par un manque d'accès à l'information et donc du blocage constaté sur cette phase.

2.2. Un processus de conception infini

Face au manque de maîtrise de projets de robotique sur chantier, la mission de conception fut confiée à un acteur de la robotique industrielle. Les acteurs concernés n'ont pas de connaissances spécifiques sur la tâche à automatiser. Pour leur faire comprendre le problème visé, des documents standards leurs sont communiqués, tels que des plans de structures, des détails de méthodes constructives ainsi que des plans de prévention (Figure 147). Cette approche fut complétée de visites de site avec observation de la tâche et de modélisations à robotiser (Figure 148).

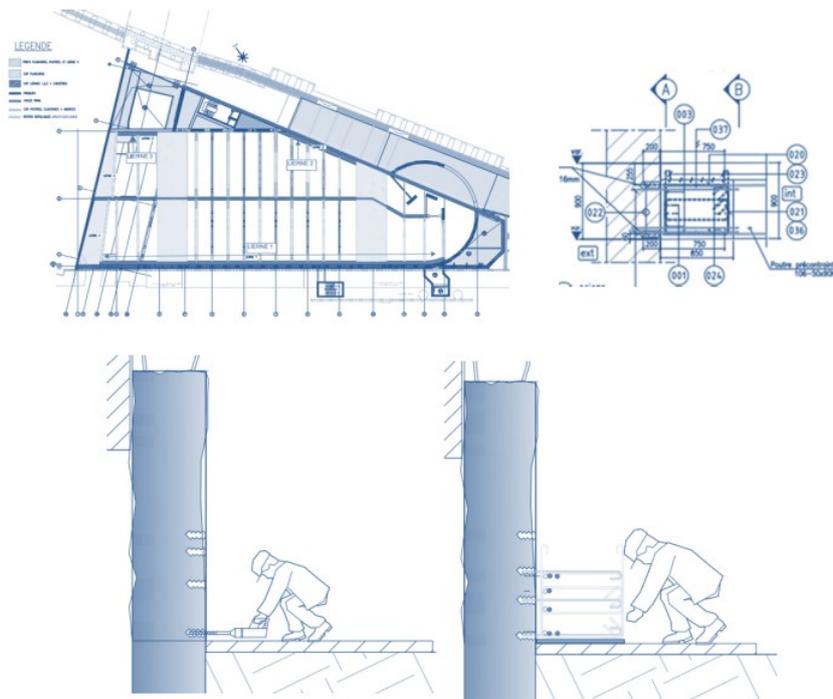


Figure 147 Documentation constructive courantes associées au concept de robot perceur

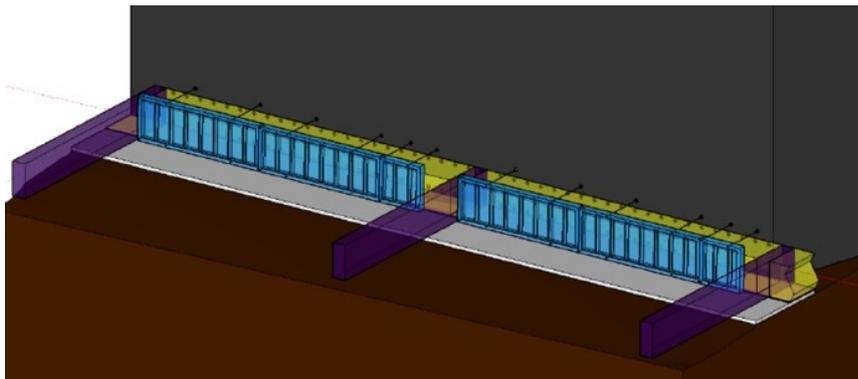


Figure 148 Modélisation complète du mode constructif sur lequel les percements interviennent

Les premières réponses se font par tâtonnement avec des esquisses ou collages associées à des interrogations qu'il s'agit de traiter au fur et à mesure que le concept se fige (Figure 149). Nous avons plus ici la marque d'un processus de mise au point que de conception. Tout du moins, ces phases de conception tendent vers l'objectif de réduire complètement les inconnues par association d'éléments connus. Ce principe va s'accélérer dans les phases suivantes avec la production de modélisations composées d'assemblages d'éléments sur catalogue (Figure 150). Cette phase, courante dans l'industrie automobile, a pour objectif de fixer la partie technique du concept et donner une impression d'aboutissement. On peut rapprocher ce procédé de celui du BIM qui à chaque étape donne une modélisation réaliste, même lorsqu'il s'agit de faisabilité. Malgré ce semblant de réalisme, ces concepts n'ont pas reçu l'approbation nécessaire au passage aux étapes de prototypage physique. Il y a ici une inadéquation entre l'apparente complexité des concepts développés et les attentes d'apparence simple des fonctions visées.

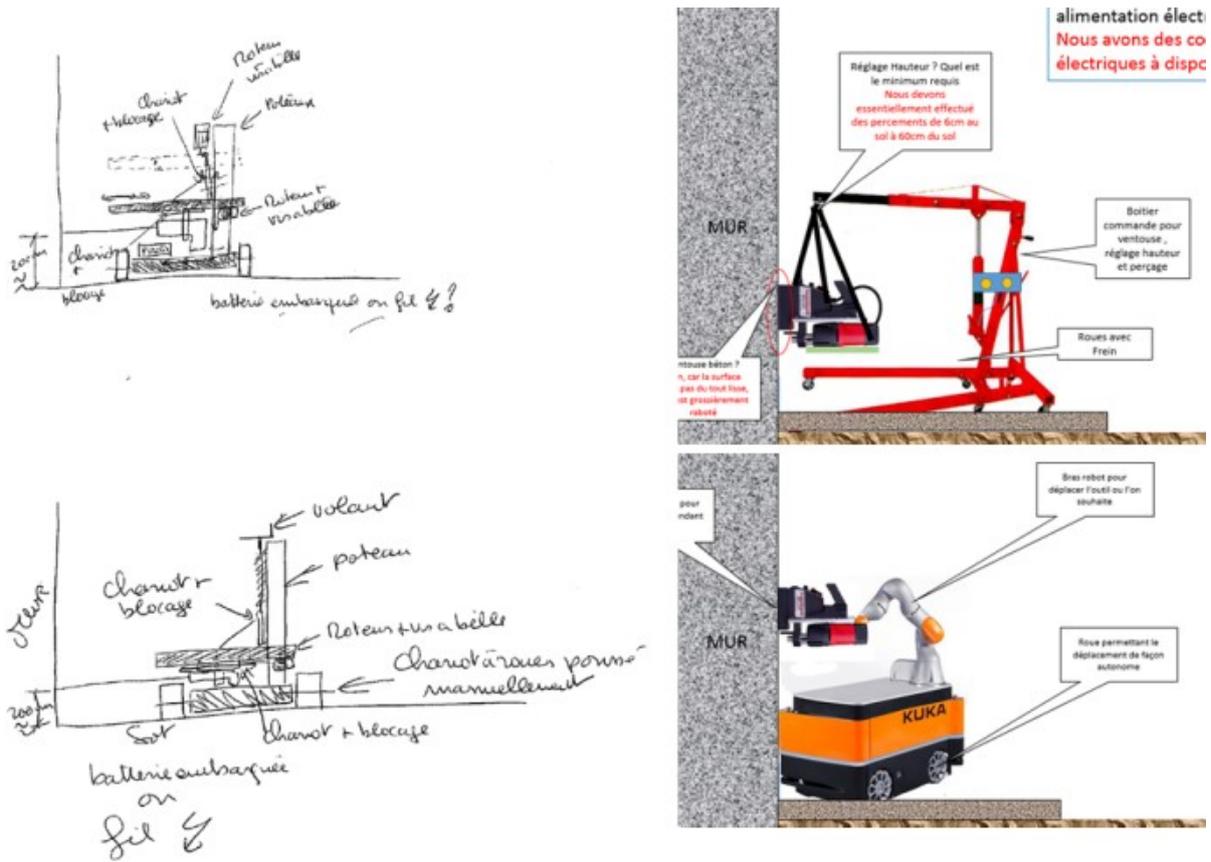


Figure 149 Schématisation initiale d'un système de perçement automatisé

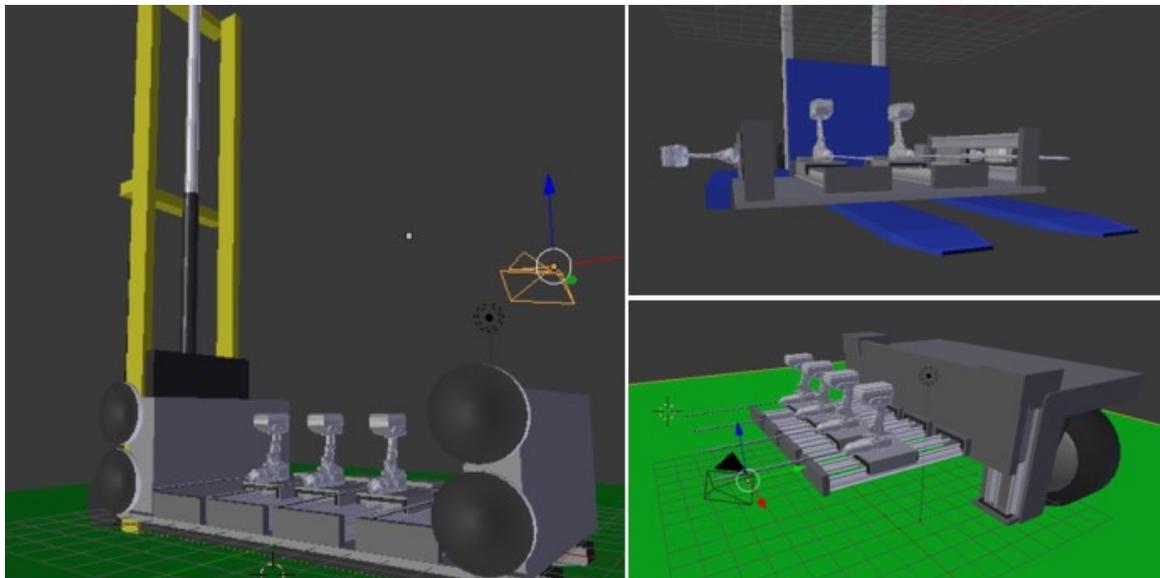


Figure 150 Deuxième étape de schématisation par modélisation d'assemblages techniques

Nous pouvons retranscrire le processus de conception sur un diagramme C-K, en suivant les mêmes règles et en repartant du point C1' de la phase précédente (Figure 151). Les expansions dans l'espace des connaissances sont réduites pour ne pas brouiller la lecture.

On observe d’abord le passage du cahier des charge dans l’espace des connaissances vers le concept « C2 » confié à l’entreprise de robotique. On voit ensuite le passage répété de l’espace des concepts à celui des connaissances pour tester ces concepts. Le test se fait par des interactions à l’intérieur même de l’espace des connaissances. On retrouve les activités d’assemblage de connaissances maîtrisées pour produire une connaissance générale du concept mieux maîtrisée.

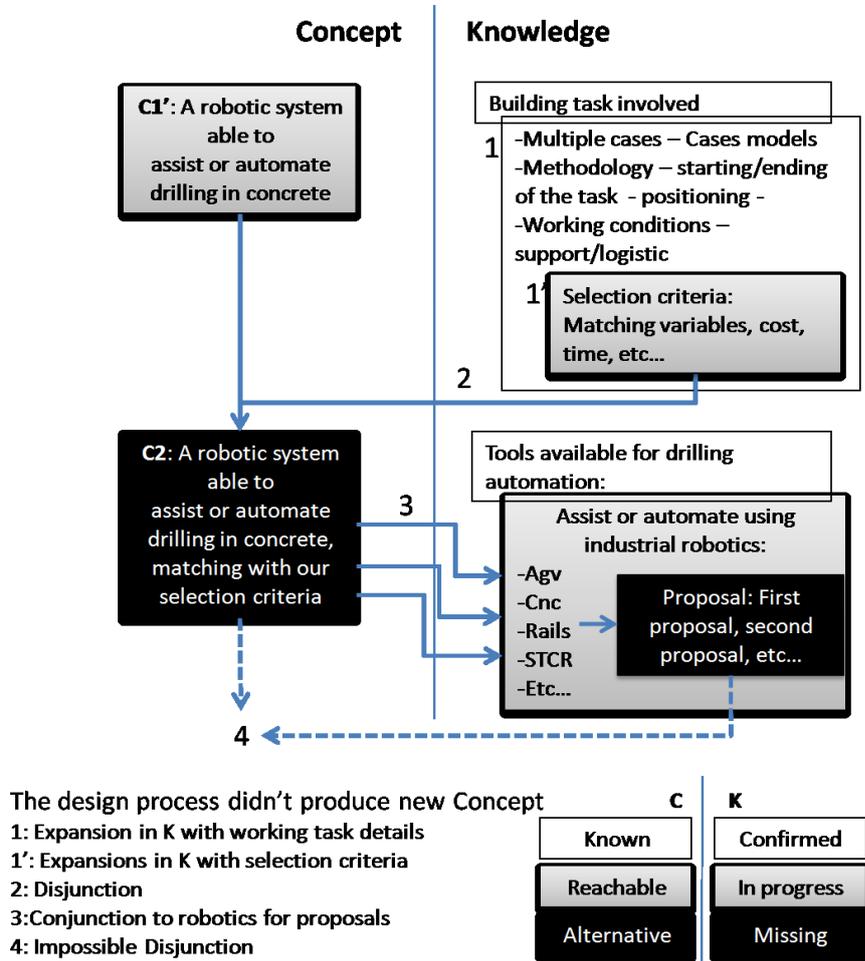


Figure 151 Modélisation C-K du processus de gestion de concepts par un intégrateur en robotique

Nous avons vu dans la première phase de conception qu’un manque dans l’espace des connaissances avait interrompu le processus de conception. Nous pouvons observer le même phénomène pour l’espace des concepts dans l’avancement du projet. Identifier l’origine de l’interruption via ce type de diagramme peut devenir pertinent dans la conduite de projets d’innovation de ce type. De plus, nous découvrons que le changement d’acteur en charge de la conception ne permet pas de reprendre le processus de conception exactement où il s’était interrompu précédemment. Cela est sûrement dû au manque de détails du cahier des charges, et donc au manque de connaissances constructives transmises entre les deux phases. Cela nous invite à prendre en compte les différences entre les connaissances collectives partagées ou mobilisées lors du projet et les expertises individuelles présumées mais non mobilisées.

2.3. Prototypage à la frontière entre connaissances et concepts.

La dernière étape concerne la fabrication d'un prototype physique. Cette étape ne se fait pas réellement dans la continuité de l'étape de modélisation, mais en garde certaines traces, notamment dans la prise en compte des concepts écartés. L'entreprise de construction prend en charge, seule, cette phase avec l'intégration de ressources spécialisées en mécatronique. Nous n'allons pas décrire l'ensemble des détails du processus de conception, ces derniers ont déjà été abordés dans le chapitre précédent. Nous allons-nous concentrer sur les choix de conception et les méthodes de validation.

La production d'un prototype a demandé d'organiser le jeu entre choix de conception et validation suivant une progression mesurable. Ceci oriente la conception, toujours par éléments, mais en les fixant progressivement pour les considérer comme acquis et constitutifs du ou des problèmes suivants. Les choix se portent donc sur : L'outil et sa mise en place ; Le type assemblage mécanique ; La motorisation et les axes de déplacements ; Le système mobile employé ; L'interface de contrôle et les systèmes de communication ; Les systèmes de guidage (non réalisé). L'ordre de citation ne reflète pas les allers-retours, ni l'ordre de soumission des choix. Il s'agit de l'ordre de validation qui peut paraître contre-intuitif pour un roboticien dont le travail sur la partie système et mécanique serait sûrement apparu en premier.

Les validations se sont faites par l'intermédiaire de plusieurs moyens (Simulation et modélisations ; Tests de mobilité ; Tests de prise en main par des opérateurs). Ceux-ci apparaissent à chaque étape du projet suivant les besoins de fixer ou non des éléments de conception et les acteurs concernés (Chef de projet, opérationnels, technicien etc...)

Un seul et même assemblage peut nécessiter plusieurs moyens de validation car il fait intervenir des enjeux qui ne sont pas mesurés de la même manière par chacun des concepteurs. Toutefois une même modélisation peut servir tant à la simulation du processus complet de mise en action de l'outil qu'au calcul de résistance mécanique comme on le voit Figure 152.

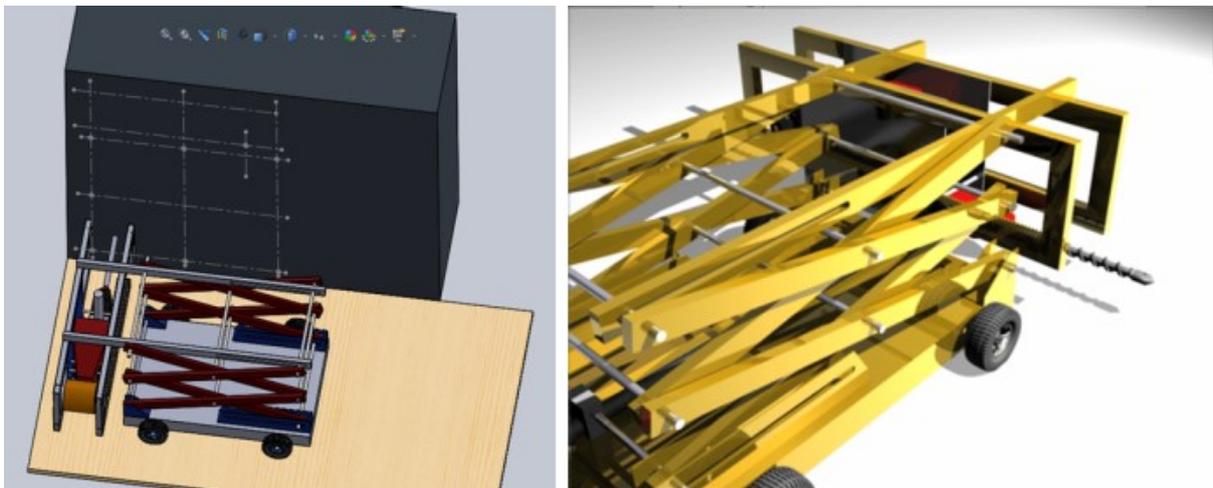


Figure 152 Simulations de résistances mécaniques et cinématiques du prototype

Ce système de conception par éléments a pour caractéristique d'offrir un nombre potentiellement infini de combinaisons qui vont s'affiner avec le temps. Mais chaque élément a lui aussi un grand nombre de combinaisons possibles. Il fut nécessaire de gérer la validation via des modélisations pour réduire les coûts de conception (Figure 153).

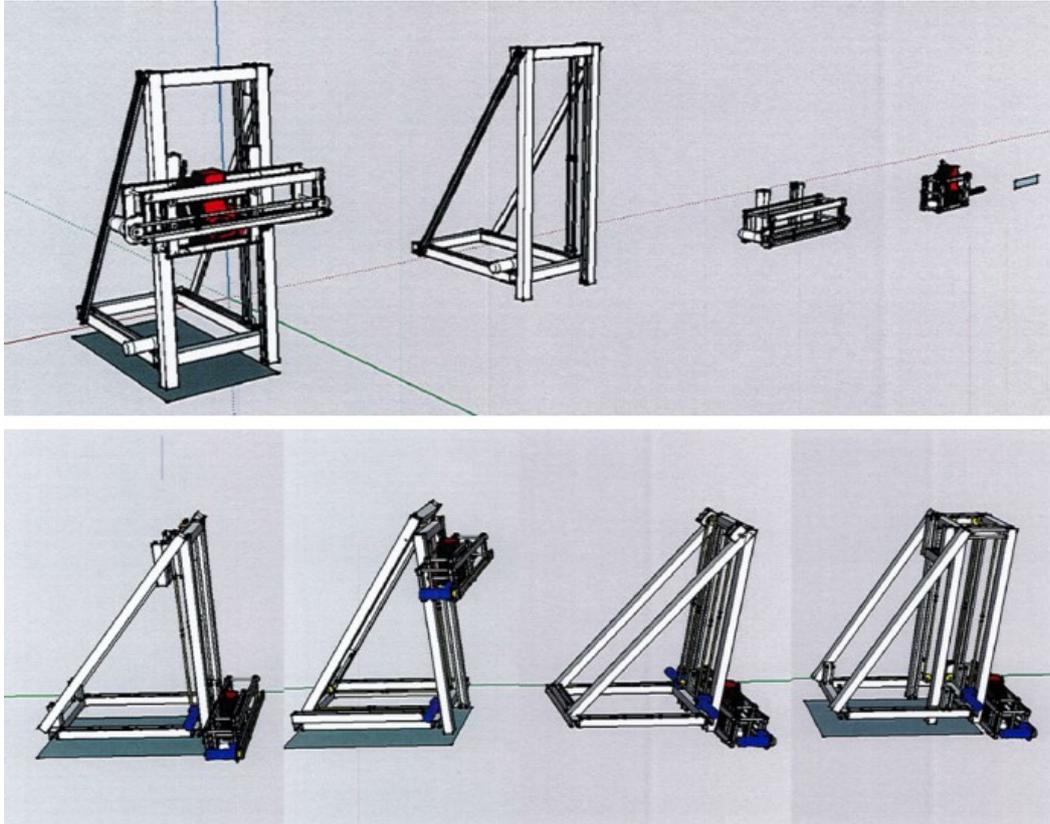


Figure 153 Variantes d'assemblages mécaniques avant production

Au fur et à mesure que le concept est fixé, interviennent les étapes de validation des systèmes de contrôle et de mobilité. Cela conduit à des tests en laboratoire puis en environnement réel tels que l'on peut l'observer Figure 154.

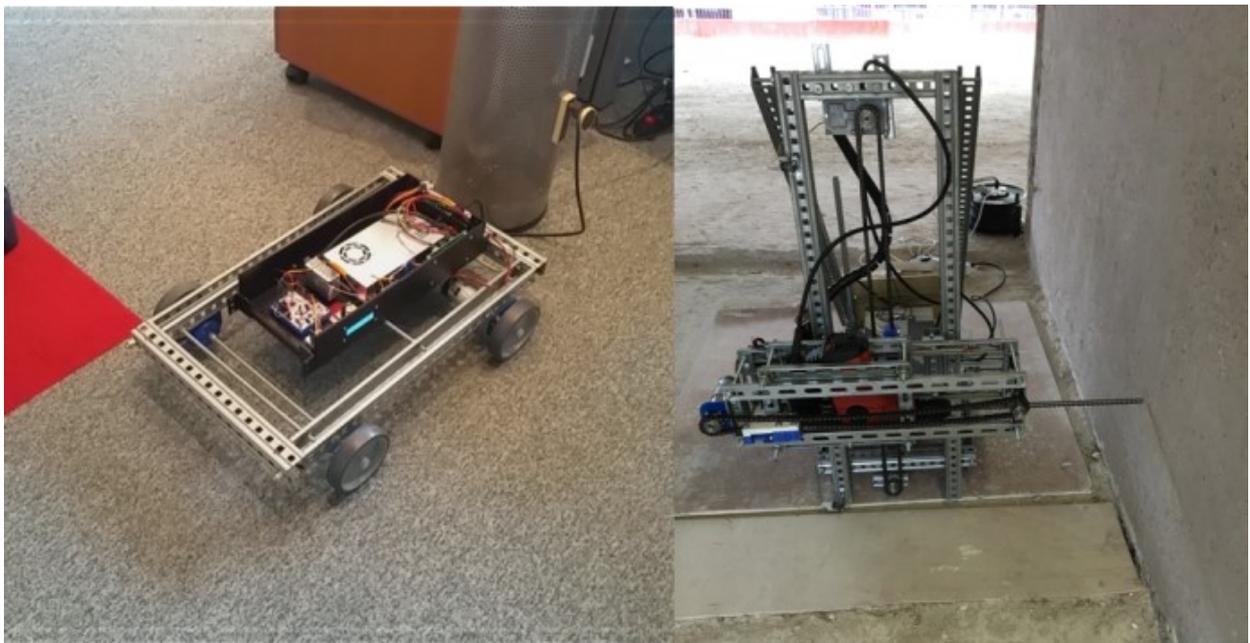
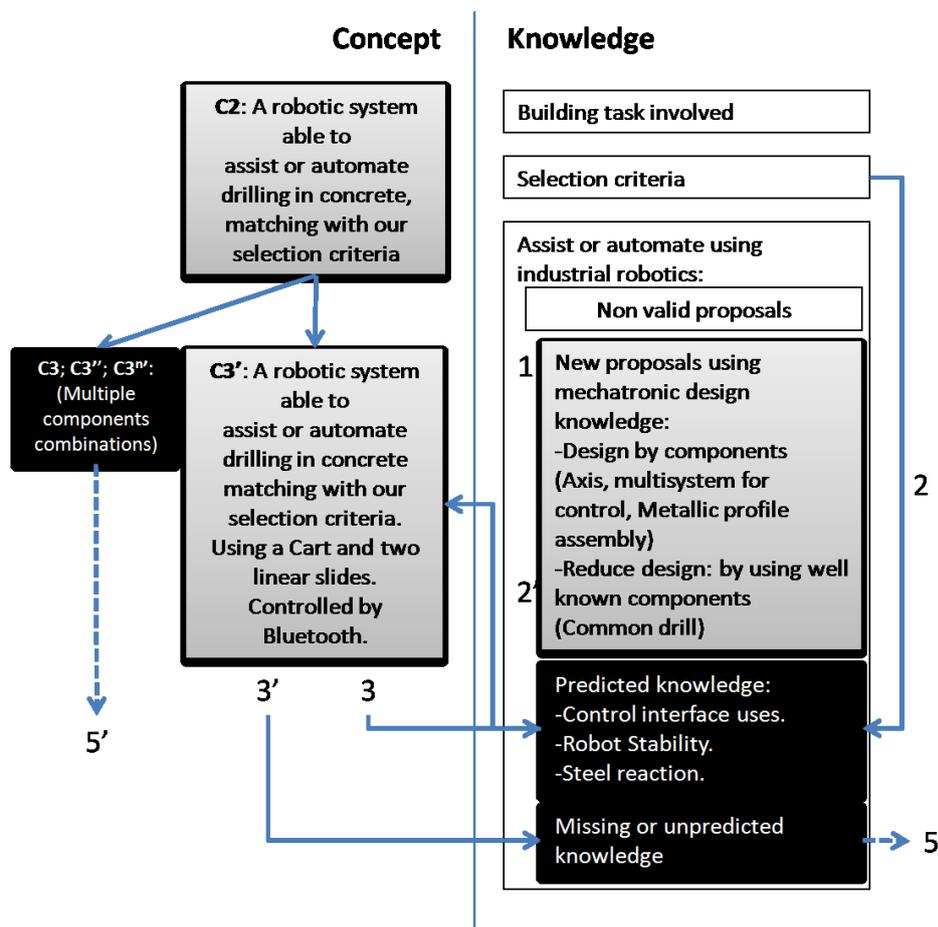


Figure 154 Tests en laboratoire et sur site à différents stades de conception

Ce jeu entre choix de conception et moyen de validation peut sembler dense et difficile à représenter simplement. Pour le diagramme C-K à associer à cette étape nous allons reprendre le même principe que pour les précédentes. C'est-à-dire une représentation des opérations et des expansions réduites pour faciliter la lecture. Nous reprenons le processus depuis le concept « C2 » fixé précédemment (Figure 155).

Nous observons que la modélisation en C-K permet bien de représenter la dynamique du prototypage sans devoir être exhaustif. Cette dynamique est complexe et mobilise tant l'espace des connaissances que l'espace des concepts en restant à leur frontière. Chaque choix de conception entraîne des expansions de connaissances. De plus le prototypage d'une solution ne fait pas disparaître les autres propositions de concepts sur un même assemblage.



Design process to enforce knowledge:

- 1: Expansion in K with new proposals
- 2: Expansion in K with predictable knowledge
- 2': Disjunctions including technical implements
- 3 3': Concept Prototyping and tests
- 4: Concept prototyping producing new criteria knowledge
- 5: Expansion in K to pursue the development process
- 5': Expansion in C to pursue the innovation process

C		K	
Known	Reachable	Confirmed	In progress
Alternative	Alternative	Missing	Missing

Figure 155 Modélisation C-K du processus de prototypage

On remarque aussi que le processus de validation apparaît dans ce type de représentation, mais pas sous la forme de moyens employés. La priorité est donnée à la représentation des critères de sélection et donc au sens que doit prendre le processus de conception. Nous aurions pu introduire ce champ dans l'espace des concepts, car après tout il s'agit de propositions et non de connaissances. Néanmoins comme pour le cas d'une commande ces critères de validation deviennent constitutifs du cahier des charge.

Nous avons là une représentation type d'un processus de prototypage qui serait peut-être caractéristique de ceux nécessaires au développement de la robotique de construction. Mais nous n'avons réalisé cet exercice que sur ce cas d'étude. Nous ne pouvons donc pas prétendre de sa reproductibilité. Nous pouvons toutefois faire des conclusions sur l'intérêt de cette structuration du processus de conception. Elle permet d'abord de favoriser le passage d'une idée à un objet dans des situations complexes où la frontière entre les connaissances et les concepts est rendue hermétique.

3. Synthèse

Nous avons pu mettre à l'épreuve deux modèles de la conception pour l'analyse des processus de conception observés lors de cette recherche. Ceux-ci nous ont permis de faire les réductions nécessaires à la détermination des points clefs de la génération et la conduite de projet de mécatronique de construction. D'abord l'identification du rôle transverse de la mesure par les liens qu'elle permet entre la conception d'un ouvrage et l'outil de production. Ensuite le découpage entre concepts et connaissances rendu nécessaire pour assurer la gestion des différentes expertises intervenant dans ce type de projets où les champs de connaissances sont nombreux.

Nous avons vu que la mesure est un élément primordial tant dans la conception architecturale, que dans la conception des outils mécatroniques. Cette importance de la mesure s'est retrouvée dans les cas de conception étudiés tout au long de cette recherche. La mesure en conception architecturale est à mettre en miroir de la mesure à appliquer en robotique de construction. L'Architecturologie nous indique que cette mesure fonctionne de différentes manières ce qui lui donne des propriétés. Elle peut ne pas être définie dans un système métrique. Elle aura ainsi une élasticité, une forme ou des proportions.

Ces propriétés se retrouvent individuellement au sein des éléments composants un système mécatronique. Nous avons identifié, dans nos projets, une correspondance entre éléments mécaniques et mesure par la forme, capteurs et mesures élastiques, programmes informatiques et mesure proportionnelles. Cette correspondance reste à vérifier sur d'autres cas d'étude ou via la production de nouveaux projets de robotique de construction. Cela pourrait d'ailleurs ouvrir d'autres sujets de recherches car les applications de ce phénomène de la conception pourraient se retrouver à différents niveaux dans le domaine de la construction.

Nous avons pu voir avec la théorie C-K des typologies de processus de conception à plusieurs stades. Nous avons observé le fonctionnement de la génération de concepts les effets limitants. Nous avons pu représenter les effets bloquant la conception par manque de prototypages de concepts. Nous avons enfin pu modéliser le processus de prototypage, concrétisant ainsi le processus de conception.

Ces outils de modélisation pourraient devenir de véritables outils de gestion de projets d'innovation dans la construction, au-delà du cas même de la robotique. Nous avons ici des pistes concernant leur emploi tant pour de la conduite de projet que pour la génération de sujets de développement. Pour aller plus loin il faudrait tester ces résultats, en conditions réelles sur des activités de R&D dans le BTP, pour les confirmer ou les préciser.

Conclusion Générale

Cette recherche avait pour objectif d'étudier l'introduction de la mécatronique dans le champ de la construction. Ce fut avant tout une aventure humaine, car ce domaine ne pouvait être exploré qu'en confrontant les aspects théoriques du développement de la robotique aux dynamiques présentes dans le monde professionnel. Nous avons observé des pratiques émergentes en Architecture autour des outils de prototypage rapide basés sur la mécatronique. Ces pratiques sont génératrices de concepts de bâtiments mobiles ou de systèmes constructifs et permettent d'en réaliser des prototypes. Nous avons imaginé qu'une forme de pratique similaire pourrait s'insérer dans les activités de conception de la construction. Celle-ci aurait permis d'installer de nouvelles manières et définir les modes de production. Mais ces activités ne sont pas traitées d'un seul tenant. La conception du chantier est morcelée, répartie entre différents acteurs. Ceci provoque une grande part d'inconnues, immobilisant tout processus de conception et favorisant la gestion en problème-solution. L'ingénieur structure, l'ingénieur d'études de prix ou l'ingénieur travaux n'ont à aucun moment la main sur l'ensemble des modes constructifs. Il ne s'agit pas de leur capacité propre, mais de leur rôle dans la conception. La transformation de leurs métiers par l'introduction de la mécatronique de conception n'était donc plus une évidence. L'usage des machines fut tout de même effectif, mais détourné pour se concentrer sur des activités de représentation. En parallèle de cette recherche nous avons pu observer le même effet sur le développement du BIM. Autre sujet d'innovation, son introduction rencontre des difficultés d'appropriation car son aspect transverse ne fait pas sens à un niveau individuel.

La génération de concepts pour la robotique de construction est tout de même présente dans nos observations. Elle est apparue spontanément à travers plusieurs demandes venant des unités de production. Elle fut aussi facilement émulée lors du montage de projets de R&D Top-Down où les concepts les plus récents de mécatronique ont pu converger vers des problématiques de chantier. Le souci de ces deux méthodes vient de la justification de tels développements. Les problématiques de chantier sont souvent associées à un seul ouvrage dans la vie d'une entreprise de construction. Elle peut ne pas trouver d'intérêt à développer un système pour un cas unique. De plus les solutions constructives incluant du travail manuel sont plus flexibles et répondent mieux aux logiques de conception d'un chantier. Les tâches de fabrication sont soumises à des aléas et ne sont totalement définies que dans les derniers instants précédant sa réalisation. Un développement initié sur une problématique de chantier ne fait pas intervenir les mêmes temps de conception. Nous avons aussi remarqué que l'élévation de ces projets à un niveau de recherche peut en altérer le sens. La découverte de verrous scientifiques pour la construction semble être un bon moyen de pousser les projets d'innovation. Mais il s'avère que l'état du développement technologique général dans l'industrie est souvent plus avancé que dans le BTP.

Toutes ces expérimentations peuvent donner une impression d'inachevé. Cela paraît tout à fait normal car nous avons participé à l'émergence de nouvelles activités. Celles-ci ne sont pas encore fixées et certaines disparaîtront naturellement si les logiques d'innovation ne sont plus mobilisées dans le monde professionnel. Malgré ces difficultés et ces imprécisions, nous avons pu faire émerger quelques règles de gestion et de conception pour ceux qui voudraient les reproduire. S'il est clair que les schémas organisationnels actuels des entreprises générales ne les permettent pas, nous pouvons envisager de nouveaux métiers chargés d'innover dans ce domaine. Ils auraient à charge de faire ressortir les éléments structurant la conception d'un bâtiment pour assurer la pertinence entre le développement de nouveaux outils de production et l'ouvrage. C'est l'Architecturologie qui nous l'a permis par sa définition de la mesure. Reste à appliquer ces observations dans le cadre de projets en identifiant les relations entre mesures attribuées par l'architecte et mesures à appliquer par un

système mécatronique de construction. Assurer un processus de prototypage de concepts est tout aussi important. Nous avons pu faire ressortir les éléments importants pour ce type d'activité grâce à la théorie C-K. Les diagrammes C-K peuvent autant devenir des outils d'analyse de projet que des outils de conception. Ils pourraient être déployés sur des cas nécessitant d'activer une génération de concepts. Ils permettraient d'éviter les effets de production de concepts infinis et favoriseraient les démarches de prototypage.

Nous savons que le développement de la robotique de construction n'en est pas à ses débuts, mais il est encore loin d'avoir remplacé les pratiques centenaires voire millénaires de la construction. On ne peut pas substituer une tâche manuelle à un système robotisé sur un chantier comme nous pourrions le faire sur une chaîne de fabrication automobile. Ces développements devront prendre en compte les spécificités du monde du bâtiment et de l'organisation de sa production. Nous pensons l'avoir fait en partie avec cette recherche, mais pour aller plus loin il serait intéressant de se pencher sur les recherches interrogeant la gestion de chantier, l'organisation des tâches et le rôle de chacun de ses acteurs. Il existe par exemple des travaux en ergonomie sur les limites du taylorisme appliqué au bâtiment (Campinos-Dubernet, 1984) et en sociologie du travail sur le pilotage d'activités distribuées (Guffond & Leconte, 2001).

Bibliographie

AFNOR. *NF E 01-010* (2008).

Agogué, M., Arnoux, F., Brown, I., & Hooge, S. (2013). *Introduction à la conception innovante*. (S.l.) : Presses des MINES.

Albert, B. (1995). Anthropologie appliquée ou « anthropologie impliquée » ? Ethnographie, minorités et développement. Dans *Les applications de l'anthropologie : un essai de réflexion collective depuis la France* (pp. 87-118). (S.l.) : (s.n.).

Allen, & Al. (2013).

Arai, T. (2011). Advanced robotics & mechatronics and their applications in construction automation. *ISARC*, (28th), 7-12.

Autran, C., & Guena, F. (2015). 3D reconstruction for museums and scattered collections applied research for the Alexandre Lenoir's museum of French monument. Dans *2015 Digital Heritage*. <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2015.7413831>

Bejaoui, A. (2017). Caractérisation des opérations cognitives spécifiques à un style collectif d'une agence. Dans *Seminaire du MAP 2017*. Paris. Repéré à <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01567063>

Ben Rajeb, S. (2012). *Modélisation de la collaboration distante dans les pratiques de conception architecturale : Caractérisation des opérations cognitives en conception collaborative instrumentée*. 'ENSA de Paris La Villette et Université Paris-Est.

Ben Rajeb, S., & Leclercq, P. (2014). Spatial augmented reality in collaborative design training: Articulation between I-space, we-space and space-between. Dans *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07464-1_32

Birglen, L. (2016). *Mécatronique*. (S.l.) : DUNOD.

Bock, T. (1988a). Robot-Oriented Design. Dans *5th ISRC* (pp. 135-144). <https://doi.org/10.1017/CBO9781139924146>

Bock, T. (1988b). Robot Oriented Design of Variable Building Kits. Dans *International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (pp. 65-72).

Bock, T., & Linner, T. (2015). *Robot-Oriented Design. Robot-Oriented Design: Design and Management Tools for the Deployment of Automation and Robotics in Construction*. (S.l.) : Cambridge university Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139924146>

Boudon, P. (1975). *Architecture et Architecturologie*. (S.l.) : (s.n.).

Boudon, P. (1992). *Introduction à l'Architecturologie*. (S.l.) : (s.n.).

Boudon, P. (2005). *Conception*. (S.l.) : Les Éditions de la Villette.

Boudon, P. (2014). De quelques fondamentaux en architecturologie. Dans *"Fondamentaux "en architecture*. Nancy.

Boudon, P., Deshayes, P., Pousin, F., & Shatz, F. (1994). *Enseigner la conception architecturale*. (S.l.) : Editions de la villette.

- Brell-Cokcan, S., & Braumann, J. (2013). *Rob/Arch 2012: Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*. (S.l.) : (s.n.).
- Campinos-Dubernet, M. (1984). La rationalisation du travail dans le BTP : Un exemple des limites du taylorisme orthodoxe. *Formation Emploi*, 6(1), 79-89. <https://doi.org/10.3406/forem.1984.1077>
- Chatila, R., Laumond, J. P., & Prajoux, R. (1987). Les robots mobiles autonomes. *La recherche en intelligence artificielle*, 335-364.
- Chedmail, P., Dombre, E., & Wenger, P. (1998). *La CAO en robotique; Outils et méthodologie*. (S.l.) : (s.n.).
- Ciblac, T., & Morel, J. C. (2014). *Sustainable Masonry: Stability and Behavior of Structures*. *Sustainable Masonry: Stability and Behavior of Structures*. (S.l.) : (s.n.). <https://doi.org/10.1002/9781119003564>
- David, A. (2005). Des Rapports Entre Generalisation Et Actionnabilite : Le Statut Des Connaissances Dans Les Etudes De Cas. *Revue Sciences de Gestion*, (39), 139-166. Repéré à [file:///Users/DURU/Documents/Mendeley Desktop/David - 2005 - DES RAPPORTS ENTRE GENERALISATION ET ACTIONNABILITE LE STATUT DES CONNAISSANCES DANS LES ETUDES DE CAS.pdf](file:///Users/DURU/Documents/Mendeley%20Desktop/David%20-%202005%20-%20DES%20RAPPORTS%20ENTRE%20GENERALISATION%20ET%20ACTIONNABILITE%20LE%20STATUT%20DES%20CONNAISSANCES%20DANS%20LES%20ETUDES%20DE%20CAS.pdf)
- De Boissieu, A., Guéna, F., & Lecourtois, C. (2010). Identifying Cognitive Operations of Conception Implied in the Uses of Parametric Modeling in Architectural Design : Toward Pedagogical Tools, 2, 563-570.
- De Boissieu, A., Lecourtois, C., & Guéna, F. (2009). Modélisation paramétrique partagée. *Computer*.
- De Boissieu, A., Lecourtois, C., & Guéna, F. (2010). Enseigner la conception architecturale avec la modélisation paramétrique : Quelle spécificité cognitive ? Dans *01_Design 7 « Conception assistée par concepteur »*. Paris.
- De Boissieu, A., Lecourtois, C., & Guéna, F. (2011). Operation of parametric modelling " and / or " operation of architectural conception "? *Generative and Parametric Design eCAADe 29 519*, 519-528. Repéré à http://www.ariam-larea.archi.fr/public/deBoissieu_2011-ecaade.pdf
- Delaveau, A.-S., Guéna, F., & Lecourtois, C. (2009). Digital as a Tool/Reference for Architectural Conception: Examples from Two Agencies: Ateliers Jean Nouvel and Jakob+MacFarlane. *27th eCAADe Conference Proceedings*, 197-204.
- Feynman, R. P. (1986). Richard P. Feynman's Minority Report to the Space Shuttle Challenger Inquiry, pages 152œ169. In [6].
- Findeli, A. (2015). La recherche-projet en design et la question de la question de recherche: essai de clarification conceptuelle. *Sciences du Design*, 1(1), 45-57.
- Findeli, A., & Coste, A. (2007). De la recherche-création à la recherche - projet : un cadre théorique et méthodologique pour la recherche architecturale. *Lieux communs*, 10, 139-161. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Foster + Partners. (2013). 3D print structures on the moon. Repéré à <http://www.fosterandpartners.com/news/archive/2013/01/foster-plus-partners-works-with-european-space-agency-to-3d-print-structures-on-the-moon/>
- Fuller, B. (2010). *Manuel d'instruction pour le vaisseau spatial terre*. (S.l.) : Lars M ller.
- Furet, B., Poullain, P., & Garnier, S. (2019). 3D printing for construction based on a complex wall of

- polymer-foam and concrete. *Additive Manufacturing*, 28(September 2018), 58-64. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.002>
- Garel, G. (2007). Les processus d'innovation, conception innovante et croissance des entreprises. (French). *Revue Française de Gestion*. <https://doi.org/10.1016/j.bloc.2014.07.006>
- Gatton, T. M., & Boyer, L. T. (1988). DESIGN FOR AUTOMATED CONSTRUCTION. *5th ISRC*.
- Gauthier, P. (2015). Création contre science en design, les conditions d'un vrai débat : réponse à Lysianne Lécho Hirt. *Sciences du Design*, 65-70.
- Gramazio, F., & Kohler, M. (2015). Gramazio Kohler Research. *ETH Zürich*.
- Guffond, J.-L., & Leconte, G. (2001). Le pilotage d'activités distribuées : le cas du chantier. *Sociologie du Travail*, 43(2), 197-214. Repéré à <http://www.jstor.org/stable/41928602>
- Hannachi-Belkadi, N. K. (2008). *Développement d'une méthodologie d'assistance au commissionnement des bâtiments à faible consommation d'énergie*. Paris Est , dans le cadre de Ville et Environnement , en partenariat avec ARIAM-LAREA (laboratoire) et le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).
- Hanson, & Al. (2013).
- Hasegawa, Y. (1991). One decade of robotics in construction. *ISARC*, 21-34.
- Hatchuel, A., Le Masson, P., Weil, B., Agogué, M., Kazakçi, A., & Hooge, S. (2016). Multiple Forms of Applications and Impacts of a Design Theory: 10 Years of Industrial Applications of C-K Theory. *Impact of Design Research on Industrial Practice*, 189-208. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19449-3_12
- Hatchuel, A., & Weil, B. (2003). A New Approach of Innovative Design: an Introduction To C-K theory. *International Conference on Engineering Design*, (January), 1-15. <https://doi.org/citeulike-article-id:4891368>
- Housley, S. (2009). Eco-pods by Howeler + Yoon Architecture and Squared Design Lab. Repéré à <https://www.dezeen.com/2009/10/02/eco-pods-by-howeler-yoon-architecture-and-squared-design-lab/>
- Hubert, B., & Bonnemaire, J. (2000). La construction des objets dans la recherche interdisciplinaire finalisée: de nouvelles exigences pour l'évaluation. *Nature Sciences Sociétés*, 8(3), 5-19. [https://doi.org/10.1016/S1240-1307\(00\)80056-4](https://doi.org/10.1016/S1240-1307(00)80056-4)
- I.A.A.R.C. (2016). The history of IAARC. Repéré à http://www.iaarc.org/pe_about.htm#5
- IAARC, P. C. (1998). *Robots and automated machines in construction*. (S.l.) : (s.n.).
- Kato, I. (1988). 21st CENTURY DEVELOPED BY ROBOTS. Dans *Symposium on Robotics in Construction*. Tokyo, Japan.
- Knippers, J., & Menges, A. (2014). Computer-Aided Design Fibrous structures : An integrative approach to design computation , simulation and fabrication for lightweight , glass and carbon fibre composite structures in architecture based on biomimetic. *Computer-Aided Design*, 52, 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.02.005>
- Larousse. (2005a). Conception. Dans *Larousse*.
- Larousse. (2005b). Mécatronique. Dans *Larousse*.
- Le Corbusier. (1925). *Urbanisme*. (S.l.) : Crès.

- Le Masson, Pascal; Weil Benoît; Hatchuel, A. (2014). *Théorie, méthodes et organisations de la conception*. (S.l.) : Presses des MINES.
- Le Masson, P., & Weil, B. (2010). Aux sources de la R&D : genèse des théories de la conception réglée en Allemagne (1840-1960). *Entreprises et Histoire*, 58, 11-50. <https://doi.org/10.3917/eh.058.0011>
- Lebahar, J. C. (2007). *La conception en design industriel et en architecture ; désir, pertinence, coopération et cognition* (Lavoisier). (S.l.) : (s.n.).
- Lechot Hirt, L. (2015). Recherche-crédation en design à plein régime : un constat , un manifeste , un programme. *Sciences du Design*, 37-44.
- Lecourtois, C. (2004). Conception de l'espace et espace de conception. *Travaux de l'Institut de Géographie de Reims*. <https://doi.org/10.3406/tigr.2004.1481>
- Lecourtois, C. (2011). Architecturological and epistemological research on collaborative design. *International Journal of Design Sciences and Technology*.
- Lecourtois, C. (2013). Modèle de la conception urbaine durable. L'écoquartier ? Dans *Rencontres RAMAU 2013, Savoirs et modèles de l'urbanisme et de l'architecture durables*.
- Lecourtois, C. (2015). Un modèle de connaissance de la conception urbaine durable. Le cas des écoquartiers. Dans *Cahiers Ramau, n°7 Architecture et urbanisme durables Modèles et savoirs*. Paris : Editions de la villette.
- Lecourtois, C., & Guéna, F. (2007). Figuration numérique et conception architecturale: modèles et échelles. Dans *SCAN'07*.
- Marcel, O. (2006). *Paysages Modes d'emploi. Pour une histoire des cultures de l'aménagement*. (S.l.) : (s.n.).
- Meyboom, A., Wojtowicz, J., & Johnson, G. (2010). Robo studio: towards architectronics? *Proceedings of the 15th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA)*, 259-268.
- Meyer, J. (2017). Les structures architecturales plissées en panneaux de bois Conception numérique et fabrication robotique, 1-12.
- Navon, R. (1995). Conceptual design of a flooring robot: development methodology and results. *Automation in Construction*. [https://doi.org/10.1016/0926-5805\(95\)00008-0](https://doi.org/10.1016/0926-5805(95)00008-0)
- OCDE. (2002). *Manual de Frascati 2002. The measurement of scientific and technological activities proposed standard practice for surveys of research and experimental development*. (S.l.) : (s.n.). <https://doi.org/10.1787/9789264065611-pt>
- Oikonomopoulou, A., Ciblac, T., & Guéna, F. (2009). Parametric studies using tools for the analysis of the stability of masonry structures. Dans *Prot. Hist. Build. PROHITECH 09 Proc. Int. Conf. Prot. Hist. Build. PROHITECH 09, Rome, Italy, 21-24 June 2009*. (S.l.) : (s.n.).
- Okuda, K., Yanagawa, Y., Kawamura, T., Ochiai, M., & Aoyagi, L. (1992). Development of the Automatic Screeding Machine Mounted on a Girder for Concrete Placing Work. *9th ISARC*.
- Pasternak, A. (2012). Robotic Prototypes Optimization. *Ecaade 30, 2*, 255-262.
- Pflimlin, E. (2017). Au Japon, la construction se met à la robotisation. Repéré à https://www.lemonde.fr/robotique/article/2017/03/16/au-japon-la-construction-se-met-a-la-robotisation_5095434_4620106.html

- Piot, O., & Carlier, J.-M. (1991). *Les influences de la robotique de construction sur les formes architecturales*.
- Rasolofo-Distler, F., & Zawadzki, C. (2011). Proposition d'un cadre conceptuel pour les CIFRE : illustration par deux thèses soutenues en contrôle de gestion. *Actes des congrès de l'Association Francophone de Comptabilité*, 1-17.
- Raspall, F. (2015). A procedural framework for design to fabrication. *Automation in Construction*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.12.003>
- Renoult, P.-M. (2015). Qu'est-ce qu'un Fablab ? Vers une révolution de la conception ! Repéré à <http://www.archibat.com/blog/quest-ce-quun-fablab-vers-une-revolution-de-la-conception/>
- Rubinstein, M., & Salagnac, J.-L. (1986). *Etat de fart de la robotiquedans le B.T.P. CAO et ROBOTIQUE EN ARCHITECTURE ET BTP*. (S.I.) : Hermes.
- Salagnac, J.-L. (1989). A general purpose positioning system for construction robotics. *ISARC*, 396-403.
- Salagnac, J.-L. (1991). Construction robotics state of the art in France. *ISARC*, 53-57.
- Salagnac, J.-L., Gallais, G., & Chevalaz, E. (1988). SOFFITO : A MOBILE ROBOT FOR FINISHING WORKS IN BUILDINGS. *ISARC*, 401-410.
- Salagnac, J.-L., & Peyret, F. (1993). CSTB Magazine N°66. *La robotique de chantier en Panne*, 21-27.
- Salagnac, J.-L., Vinot, B., & Pujol, D. (1990). Positioning with ultra sonic sensors: review of techniques and presentation of a new system. *7th isarc*, 253-260.
- Sebillotte, M. (2000). Territoires : de l'espace physique au construit social. Les enjeux pour demain et les apports de la recherche Farmland: From physical space to social construct. Challenges for the future and the contribution of research. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 7(6), 474-9. <https://doi.org/10.1051/ocl.2000.0474>
- Sellami Mezghanni, B. (LGC-I. de T.-F. & C.-F. de S.-T. (2010). Investissement en R&D et performance de l'entreprise : L'effet modérateur de la gouvernance d'entreprise. Dans *30 ème congrès de l'Association Francophone de Comptabilité*.
- Silvestere, J., Ikeda, Y., & Guena, F. (2016). Artificial Imagination of Architecture with Deep Convolutional Neural Network. Dans *Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing, Proceedings of the 21st International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA 2016*.
- STRATEX FLOOR. (2014). ROBOTUS. Repéré à <http://www.robotus.it/technology-department/robotic-power-trowel-15/en>
- Tanaka, N., Saito, M., Arai, K., Banno, K., Ochi, T., & Kikuchi, S. (1986). *The Development of the « Mark II » Mobile Robot for Concrete Slab Finishing*. *CAO et ROBOTIQUE EN ARCHITECTURE ET BTP*. (S.I.) : Hermes.
- Tric, O. (1999). *Conception et projet en Architecture* (L'Harmatta). (S.I.) : (s.n.).
- Vermersch, D. (2008). De l'objectivation scientifique à la recherche finalisée : quels enjeux éthiques ? *Natures Sciences Sociétés*, 2(16), 159-164. <https://doi.org/10.1051/nss:2008041>
- Wikipedia. (2008). Mécatronique. Repéré à <https://fr.wikipedia.org/wiki/Mécatronique>
- Wikipedia. (2012). Mechatronics. Repéré à <https://en.wikipedia.org/wiki/Mechatronics>
- Wikipedia. (2017a). Le cycle du Hype. Repéré à https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_du_hype

- Wikipedia. (2017b). Recherche-action. Repéré à <https://fr.wikipedia.org/wiki/Recherche-action>
- Zedin, T. (2012). La mécatronique de construction et la conception architecturale.
- Zedin, T., Guéna, F., & Marchand, O. (2016). La mécatronique dans le processus de conception des outils de construction : La mesure au sein d' un continuum numérique. Dans *SCAN 16 Séminaire de Conception Architecturale Numérique, Interaction(s) des maquettes numériques*. Toulouse : PUN.
- Zedin, T., Vitalis, L., Guéna, F., & Marchand, O. (2017). A method based on C-K Theory for fast STCR development: The case of a drilling robot design. Dans *ISARC 34th*. Taipei.
- Zizar, W. (2014). Bios de robots : Unimate, le premier ouvrier mécanique. Repéré à <http://www.usinenouvelle.com/article/bios-de-robots-unimate-le-premier-ouvrier-mecanique.N276769>

De la mécatronique de conception vers la mécatronique de construction

Résumé

Il s'agit d'une recherche en architecture portant sur l'intégration de la mécatronique dans la conception des chantiers de construction. La mécatronique est une démarche de conception par combinaison des techniques électroniques informatiques et mécaniques. On retrouve la mécatronique dans des objets du quotidien, mais surtout comme outil de production dans l'industrie avec la robotique. La recherche sur la « mécatronique de construction » existe depuis les années 70 à l'initiative du secteur de la construction au Japon. En architecture la « mécatronique de conception » a permis l'émergence de nouvelles pratiques autour de la fabrication. Celles-ci sont apparues dans les années 2000, grâce à l'accès aux machines à commandes numériques et aux microcontrôleurs dans le milieu académique. Ces objets de recherche et ces nouvelles pratiques sont difficilement observables dans l'industrie de la construction. La mécatronique semble relativement absente des chantiers et la robotique de construction ne fait pas encore partie des catalogues d'engins de construction. La mécatronique de conception ne fait pas encore partie des outils des bureaux d'études. Nous avons donc cherché à connaître les processus de conception des systèmes mécatroniques pour la construction. Pour cela nous avons confronté la mécatronique aux processus de conception des chantiers d'une entreprise générale de construction. Nous avons réalisé une série d'expériences sous forme de cas d'étude en observation participante. Ces cas d'étude concernent la production de concepts de mécatronique de construction associés à la mise au point des chantiers. Nous avons mobilisé les acteurs de la conception des chantiers (bureaux d'étude, services d'ingénierie technique, conducteurs de travaux) pour travailler sur différents aspects de la mécatronique adaptée à leurs métiers. Cette connaissance de la conception doit nécessairement s'appuyer sur un socle scientifique. L'architecture n'étant pas une discipline scientifique, nous nous sommes appuyés sur des théories de la conception telles que l'Architecturologie développée au sein du laboratoire MAACC. Celles-ci nous ont servi de grille de lecture pour nos observations et de support pour proposer des méthodes de conception de la mécatronique de construction.

Mots clefs : Conception ; Construction ; Architecture ; Robotique ; Mécatronique ; Automatisation ; Architecturologie ; Théorie C-K

Abstract

This research is developed in the field of architecture. It aims at studying the development of mechatronics in construction design and especially building sites. Mechatronics is a design process combining mechanics, electronics and informatics. It can be found in a lot of manufactured products, and is used in industry for production with the growth of robotics. The research in "Construction mechatronics" began in the early 70's in Japan. Later, the rise of rapid prototyping created new practices in architecture for "Design mechatronics". It appeared in the early 2000's thanks to the spread of CNC machining and microcontrollers in academic environments. These new practices and research fields are hardly observable in the construction industry. Mechatronics seems to be missing on building sites and not accessible. Also, Design mechatronics is not present in every design and technical departments. Thus, we focused on producing knowledges about the design processes attached to the integration of mechatronics in construction field. We did it by confronting this integration with a regular construction company activities. This led us to a series of experiments by case study in action-research. These cases are focussing on the concepts production for construction robotics. It involved multiple actors charged to the organisation and design of building sites. We looked at their reasoning to match mechatronics with their crafts and occupations. These studies had to be bound to scientific foundations. Architecture is not a scientific discipline, but can be related to Design sciences such as Architecturology developed in the MAACC laboratory. Design sciences helped us to analyse these observations and constitute design methods to design construction mechatronics systems.

Key words: Design; Construction; Architecture; Robotics; Mechatronics; Automation; Architecturology; C-K Theory